



Titre: Microsimulation d'un réseau d'autobus défini dans le format GTFS
Title:

Auteur: Philippe Gaudette
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Gaudette, P. (2015). Microsimulation d'un réseau d'autobus défini dans le format GTFS [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/1753/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1753/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Robert Chapleau
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MICROSIMULATION D'UN RÉSEAU D'AUTOBUS DÉFINI DANS LE FORMAT GTFS

PHILIPPE GAUDETTE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUES ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

JUIN 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MICROSIMULATION D'UN RÉSEAU D'AUTOBUS DÉFINI DANS LE FORMAT GTFS

présenté par : GAUDETTE Philippe

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FAROOQ Bilal, Ph. D., président

M. CHAPLEAU Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. LAVIGUEUR Pierre, M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

D’abord et avant tout, je tiens à remercier le professeur Robert Chapleau, directeur de recherche, pour son dévouement et sa générosité. Sa passion et ses réflexions ont suscité une profonde prise de conscience guidant mon développement et ce passage sous sa supervision demeurera marquant. Je remercie aussi les autres membres du Groupe MADITUC, Bruno Allard, Daniel Piché, Guillaume Bisailon et Vincent Dionne pour leur soutien technique, leurs conseils et leur compagnie.

Par ailleurs, je ne peux passer sous silence les étudiants côtoyés lors cette maîtrise à l’École Polytechnique. Merci donc à André, Jean-Simon, Marc-André, Florian, Galo, Annick, Alexis, Gabriel et Philippe pour les échanges et les amitiés développées. Une pensée particulière est aussi adressée à ma famille, mes amis de longue date ainsi qu’à Audray pour leur immense support de tous moments.

Enfin, je remercie la STL pour les données fournies ainsi que le ministère de Transports du Québec et le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies pour leur soutien financier.

RÉSUMÉ

Le contexte de la planification des systèmes de transport collectif est en évolution, marqué par l'émergence de multiples ensembles de données. D'une part, les agences de transport public implantent, de plus en plus systématiquement, des systèmes automatiques de collecte de données tels que les systèmes de perception des titres de transport par cartes à puce. D'autre part, les données des horaires planifiés sont rendues disponibles sous un format standardisé (GTFS) pour transmettre une plus grande quantité d'information aux voyageurs. Par ailleurs, l'apparition de modèles ouverts de microsimulation basés sur des agents engendre un nouveau potentiel de modélisation à un niveau de résolution plus détaillé, permettant le développement de nouveaux outils pour analyser et représenter une réalité complexe.

Le présent projet s'inscrit dans une démarche exploratoire visant l'intégration de ces données et la mise à profit concordante des nouvelles approches de modélisation pour l'amélioration des processus de planification. L'objectif est donc de réaliser une microsimulation d'un réseau de transport de surface de taille moyenne défini dans le format GTFS. L'étude du cas de la Société de transport de Laval agit à titre de démonstration.

Un accent est porté sur le traitement soigné des données et de leur intégration cohérente. Une procédure permettant de traiter les données GTFS pour en générer un réseau routier soutenant une offre de transport collectif est tout d'abord développée. Par la suite, une demande de transport est dérivée d'un ensemble complet de données de transactions de cartes à puce d'une journée de semaine, dont a priori seule une information temporelle, le moment d'embarquement, est connue. Les paires origine-destination sont estimées à partir de l'appariement de chaque voyage planifié à un véhicule en particulier. La comparaison des moments de transaction aux heures de passage prévues mène à l'identification des lieux de montées alors que l'étude de la séquence de déplacements des usagers permet de suggérer des lieux de descente.

L'affectation dynamique, à l'aide de TRANSIMS, d'une demande définie déplacement par déplacement sur un réseau de transport en commun avec un service à l'horaire permet de générer divers indicateurs caractérisant l'utilisation du réseau et le niveau de service. Les résultats détaillés sont propices à de nombreuses visualisations, rendues encore plus sophistiquées avec les données aboutissant de microsimulations permettant leur animation.

ABSTRACT

The planning of transit systems is rapidly evolving, thanks in part to the emergence of multiple new data sets. First, automatic data collection systems such as smart cards used in public transit ticketing have recently experienced a significant growth and are now ubiquitous. Second, schedules are now commonly available in a standardized format (GTFS) so as to provide more detailed information to travelers. Third, the appearance of open agent-based microsimulation models has given birth to a new potential for increasing model resolution, enabling the development of tools for the analysis and representation of a complex reality.

This project aims to integrate these data sets in order to leverage new modeling approaches to improve the transit planning process. This is accomplished through the construction of a microscopic model of surface transit network defined in the GTFS format. A case study of the Société de transport de Laval is used for demonstration purposes.

An emphasis is placed on the careful processing of the data and their coherent integration. First, a procedure converts GTFS data to generate a road network supporting a public transit supply. Subsequently, demand is derived from a comprehensive set of smart card transactions of a week day, of which at first glance only temporal information – the boarding time – is known. Origin-destination pairs are estimated by coupling each planned run to a specific transit vehicle. Comparing transaction times to the stop times leads to the identification of boarding locations, while studying the trip sequence allows the assessment of alighting stops.

Dynamic assignment, via TRANSIMS, of a demand defined trip-by-trip on a schedule-based public transport network generates various indicators characterizing network utilization and level of service. The obtained results also facilitate data visualisation, including those stemming directly from the microsimulation itself.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Structure du mémoire	2
CHAPITRE 2 CONTEXTE ET LITTÉRATURE.....	4
2.1 Approche totalement désagrégée	4
2.2 Modélisation à partir de nouveaux ensembles de données	6
2.2.1 Données de cartes à puce	6
2.2.2 Données GTFS	7
2.3 Modèles de microsimulation basés sur les activités.....	8
2.3.1 Simulation dynamique.....	10
2.3.2 Constitution de la demande	10
2.4 Défis d'intégration.....	11
2.5 SIG en transport	12
2.6 Cas : Société de transport de Laval	13
CHAPITRE 3 RÉSEAU DE TRANSPORT DE SURFACE	15

3.1	Organisation du service et identification des objets.....	15
3.2	Format GTFS.....	16
3.2.1	Structuration du GTFS à la STL	17
3.2.2	Enrichissement et uniformisation.....	20
3.2.3	Portrait et évaluation des ressources	22
CHAPITRE 4 DEMANDE.....		26
4.1	Système de perception des titres de transport	26
4.1.1	Fonctionnement.....	26
4.2	Ensemble de données	27
4.2.1	Convergence vers le métro.....	29
4.2.2	Enrichissement	34
4.3	Dérivation des origines et destinations.....	36
4.3.1	Appariement des voyages aux véhicules.....	37
4.3.2	Identification des origines	42
4.3.3	Identification des destinations.....	44
4.4	Portrait.....	48
4.4.1	Profil de charge	52
CHAPITRE 5 MODÉLISATION AVEC TRANSIMS.....		55
5.1	TRANSIMS.....	55
5.1.1	Organisation	55
5.2	Éléments constitutifs du réseau	57
CHAPITRE 6 MICROSIMULATION.....		61
6.1	Codification de l'offre.....	61
6.1.1	Préparation du réseau routier.....	63

6.1.2	Offre de transport en commun	65
6.2	Demande.....	67
6.3	Résultats	68
6.3.1	Affectation dynamique des déplacements.....	69
6.3.2	Microsimulation	73
CHAPITRE 7	CONCLUSION	76
7.1	Résultats	76
7.2	Perspectives	77
BIBLIOGRAPHIE	80
ANNEXES	86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Caractéristiques des éléments d'un SIG utilisés pour une simulation de transport ..	13
Tableau 3-1: Résumé des principales tables du GTFS.....	17
Tableau 3-2: Recensement des objets présents dans le GTFS (jour de semaine, liste d'automne 2013).....	18
Tableau 3-3: Décomposition des identifiants uniques du GTFS de la STL.....	19
Tableau 3-4: Ressources (véh-h et véh-km) utilisées segmentées par périodes.....	23
Tableau 4-1: Information sur les transactions contenue dans la base de données	29
Tableau 4-2: Titres pour les transactions effectuées sur le réseau régulier de la STL (68 808 transactions)	31
Tableau 4-3: Attributs d'une transaction composant une correspondance de la STL vers le métro	34
Tableau 4-4: Correspondances de la STL vers le métro	34
Tableau 4-5: Stations nécessitant des corrections aux heures de validation	36
Tableau 4-6: Voyages assignés aux véhicules selon la méthode utilisée.....	42
Tableau 4-7 : Lieux de descentes estimés avec la séquence de déplacement	46
Tableau 4-8: Nombre de déplacements et de correspondances.....	48
Tableau 4-9: Passagers-km, passagers-heures et taux d'occupation.....	49
Tableau 4-10: Caractérisation de la ligne 42, divisée en trois tronçons.....	51
Tableau 6-1: Nombre d'objets de chaque type constituant le réseau.....	66
Tableau 6-2: Résultats pouvant être tirés d'une affectation dynamique des déplacements.....	69
Tableau 6-3: Indicateurs systémiques de l'affectation dynamique.....	70
Tableau 6-4: Division des déplacements issus de l'affectation dynamique par segments	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Organisation du mémoire	3
Figure 2-1: Représentation de la ville de Laval et du réseau de la STL	14
Figure 3-1: Schéma de l'organisation du service	16
Figure 3-2: Attributs des principales tables du GTFS et les relations entre elles	17
Figure 3-3: Génération d'un <i>stop_times</i> « à la seconde »	22
Figure 3-4: Distribution temporelle du nombre de véhicules en service commercial	24
Figure 3-5: Illustration des origines et des destinations des voyages débutants entre 5:00 et 9:00 selon les secteurs municipaux ainsi que le nombre de passages aux arrêts	25
Figure 4-1: Girouette d'un autobus	28
Figure 4-2: Schéma des objets dans le fichier de transactions	28
Figure 4-3: Nombre de supports selon les réseaux touchés	30
Figure 4-4: Distribution des transactions dont les supports ont effectué au moins une transaction sur le service régulier de la STL.....	31
Figure 4-5: Répartition de l'utilisation des réseaux (nombre total de transactions et nombre de transactions de type d'opération 1	32
Figure 4-6: Distribution temporelle des transactions selon le réseau emprunté (périodes de 10 minutes).....	33
Figure 4-7: Correspondances de la STL vers le métro	34
Figure 4-8: Étapes menant à l'estimation des origines et destinations	36
Figure 4-9: Relation entre l'horaire planifié et les validations issues d'un système AFC	38
Figure 4-10: Schématisation de la procédure d'ancrage à une station de métro	40
Figure 4-11: Utilisation du concept de tournée pour l'association d'un voyage à un véhicule	41
Figure 4-12: Fixation spatio-temporelle d'un véhicule	43
Figure 4-13: Estimation des lieux de descente à partir de la séquence de voyages empruntés	46

Figure 4-14: Exemple de répartition proportionnelle des arrêts de descente	48
Figure 4-15: Montants et descendants sur la ligne 42, journée entière et période AM.....	51
Figure 4-16: Profil de charge d'un voyage dérivé des transactions de cartes à puce	53
Figure 4-17: Profils de charge de voyages consécutifs d'une même ligne en après-midi.....	54
Figure 5-1: Organisation des éléments menant à de l'utilisation de TRANSIMS.....	56
Figure 5-2: Capture de l'interface de TRANSIMS Studio.....	57
Figure 5-3: Éléments constitutifs d'un réseau avec leurs attributs principaux	58
Figure 5-4: Représentation schématique des éléments d'un réseau.....	58
Figure 5-5: Schématisation d'un déplacement en transport en commun	59
Figure 5-6: Représentation des différentes couches utilisées par TRANSIMS dans le calcul d'itinéraires	59
Figure 6-1: Schématisation des étapes liées à une microsimulation avec TRANSIMS.....	62
Figure 6-2: Représentation de la codification du réseau dans un SIG	64
Figure 6-3: Schéma du réseau codifié	65
Figure 6-4: Isochrones des temps de parcours à partir de la station Cartier (départ à 16:00:00)...	67
Figure 6-5: Éléments constitutifs de la demande	68
Figure 6-6: Distribution des durées de chaque type de segment.....	71
Figure 6-7: Comparaison d'un profil de charge issu d'une affection avec celui obtenu des lieux de montées et de descentes estimés à partir des transactions de CAP	72
Figure 6-8: Exemple de visualisation des résultats dans un SIG à partir de <i>shapefiles</i> produits par TRANSIMS.....	73
Figure 6-9: Capture de l'interface de TransimsVIS	74
Figure 6-10: Capture d'une animation de la microsimulation réalisée avec TransimsVIS	75

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADC	<i>automatic data collection</i> (collecte automatique de données)
AFC	<i>automatic fare collection</i> (perception automatique des titres de transport)
AOT	autorité organisatrice de transports (en commun)
APC	<i>automatic passenger counter</i> (comptage automatique de passagers)
AVL	<i>automatic vehicle location</i> (localisation automatique du véhicule)
CAP	carte à puce
CATI	<i>computer-assisted telephone interview</i> (entrevue téléphonique assistée par ordinateur)
DABI	<i>driver-assisted bus interview</i> (entrevue dans l'autobus assistée par le chauffeur)
GPS	<i>global positioning system</i> (système de mondial de localisation)
GTFS	<i>General Transit Feed Specification</i> (spécification générale pour les flux (de données) relatifs aux transports en commun)
MADITUC	Modèle d'analyse désagrégée des itinéraires de transport urbain collectif
MATSim	Multi-Agent Transport Simulation Toolkit
OD	origine-destination
PSC	procédure séquentielle classique
SHP	<i>shapefile</i> (fichier de forme)

SIG	système d'information géographique
STL	Société de transport de Laval
STM	Société de transport de Montréal
TC	transport en commun
TRANSIMS	Transportation Analysis Simulation System
véh-h	véhicules-heures
véh-km	véhicules-kilomètres

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Extrait d’un fichier stop_times enrichi	86
Annexe B – Extrait du fichier de transactions de cartes à puce	87
Annexe C – Diagramme pour la méthode de répartition des arrêts de descente.....	88
Annexe D – Profils de charge	89
Annexe E – Extraits des fichiers préparés pour une simulation dans transims	90
Annexe F – Exemple de résultats globaux d’une affection dynamique dans TRANSIMS	93

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'émergence des technologies informationnelles observée au cours des dernières années n'épargne pas le domaine des transports. À l'ère du phénomène « big data », l'utilisation de quantités croissantes de données présente un défi d'importance, notamment au sein des sociétés de transport, composant désormais avec divers outils des mesures, de contrôle, de localisation, de comptage, etc. Un des enjeux de cette évolution consiste à ajuster les modèles actuels pour en créer de nouveaux plus adaptés permettant ainsi l'optimisation de la performance des services (Slavin, Rabinowicz, Brandon, Flammia, & Freimer, 2009). Quel que soit le niveau d'analyse choisi d'une étude, pour une région entière, un corridor de transport ou un lieu en particulier, la planification des réseaux de transport, opérationnelle ou à long terme, bénéficiera de cette révolution lorsque sera atteinte la capacité à colliger l'information et à intégrer dans un tout cohérent des données de sources multiples pour générer de meilleurs outils. Le processus de planification s'appuyant sur la compréhension du fonctionnement du système et sur la prévision des impacts suivant l'implantation de différentes mesures et politiques, ces agences ont intérêt à profiter de l'évolution considérable de l'approche de modélisation des systèmes de transport collectif ayant eu lieu au cours des dernières années, notamment grâce au développement des capacités computationnelles et à la disponibilité des données.

1.1 Objectifs

La plupart des opérations de modélisation des réseaux de transport de surface actuellement effectuées dans la région de Montréal ne s'appuie pas sur des modèles dynamiques, tout en se basant sur une représentation simplifiée des réseaux et des horaires. L'utilisation de plus en plus généralisée des données des horaires planifiés des systèmes de transport en commun sous le format standardisé GTFS offre une nouvelle opportunité de profiter de nouveaux modèles pour offrir des outils supplémentaires aux planificateurs.

Dans le contexte technologique actuel, l'objectif est donc de réaliser une microsimulation dynamique d'un réseau de transport d'autobus sur une agence de transport de taille moyenne en utilisant les données d'offre de transport sous le format GTFS.

Rendue aujourd'hui possible et accessible, une modélisation dynamique soutiendra une analyse fine d'un réseau planifié permettant le développement d'indicateurs précis. Les résultats

permettront différents types de visualisation du réseau et de ses objets, notamment par la réalisation d'animations et l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG). La Société de transport de Laval (STL) servira d'exemple et les expérimentations réalisées s'appuieront sur leurs données.

La démarche exploratoire soutenant ce projet vise à identifier le potentiel de logiciels libres, combiné au rassemblement de données, pour des fins de planification. Une procédure complète et généralisable permettant de traiter les données GTFS pour les intégrer à un modèle de microsimulation avec une approche totalement désagrégée permettrait de modéliser efficacement les systèmes de transport collectif de n'importe quelle agence de transport utilisant ce format de données standardisé. Cela faciliterait aussi l'intégration de données des horaires de diverses agences d'une même région même si elles sont développées indépendamment.

1.2 Structure du mémoire

Dans un premier temps, une revue de littérature établira les fondements à la base de l'élaboration des expérimentations. Deuxièmement, une analyse détaillée du format de données GTFS sera réalisée pour comprendre leur potentiel d'utilisation et les conventions que les diverses agences de transport de la région de Montréal devraient adopter afin d'assurer une cohérence et faciliter l'intégration de leurs services dans le modèle de microsimulation. Un jeu de données de transactions de cartes à puce sera étudié afin de dériver les origines et les destinations des usagers et ainsi générer une demande à affecter sur le réseau de transport de surface. Par la suite, après avoir décrit le fonctionnement de la plate-forme de simulation TRANSIMS, une description détaillée du modèle développé à partir des données GTFS sera présentée. Enfin, une analyse des données résultant de la simulation sera proposée afin d'établir le potentiel d'un tel modèle pour des fins de planification.

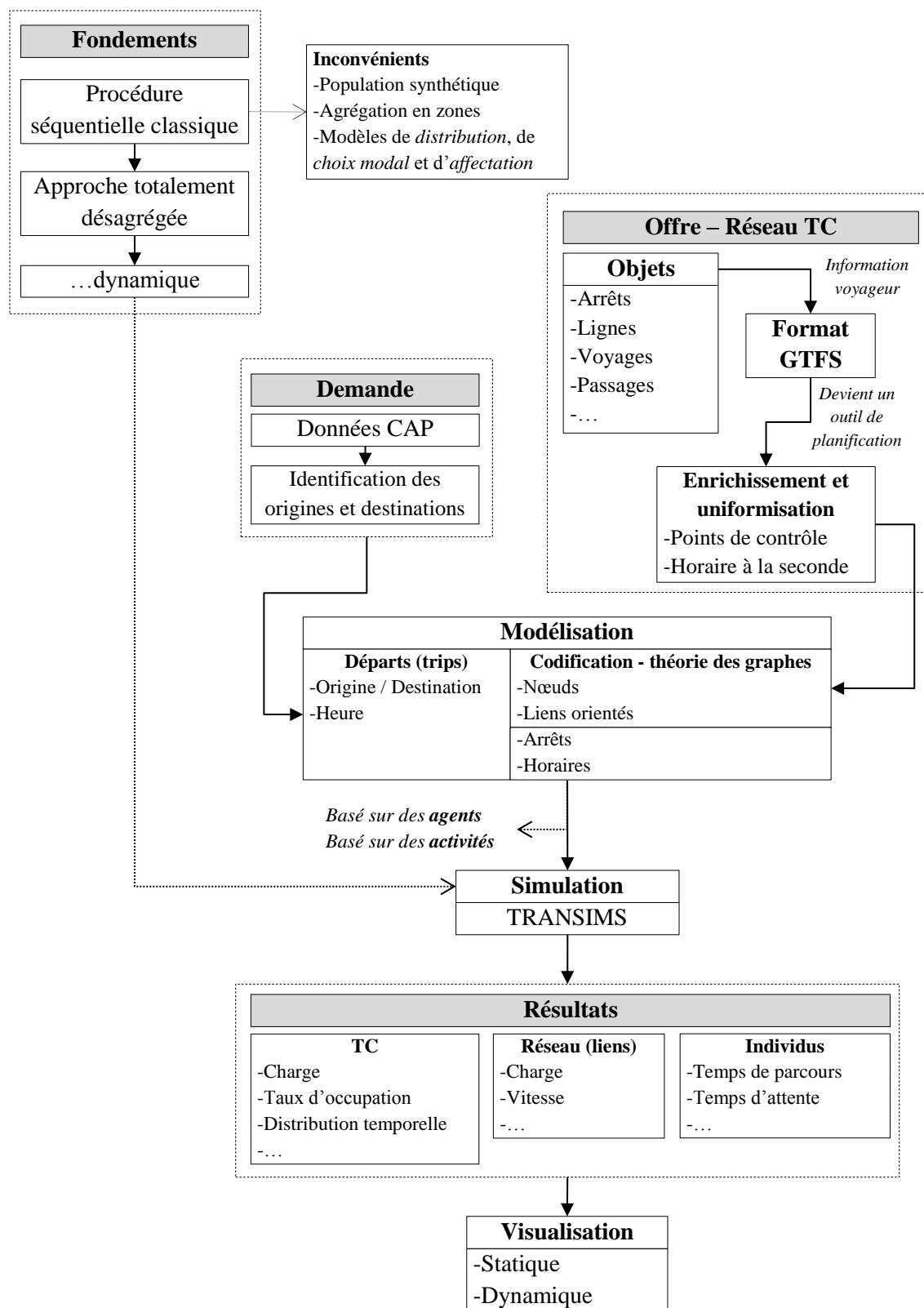


Figure 1-1: Organisation du mémoire

CHAPITRE 2 CONTEXTE ET LITTÉRATURE

Le projet s'inscrit dans un nouveau contexte où la croissance des technologies a un impact important sur les capacités informationnelles et leur capacité de stockage de données, présentes de plus en plus en grand nombre et sous divers formats. Les transports publics ne sont évidemment pas épargnés par cette évolution, où les méthodes de planification sont amenées à se modifier. Cette section décrit donc les avancées et les courants en matière de modélisation des systèmes de transport collectif dans une perspective de planification. L'utilisation de certains ensembles de données sera abordée avant d'en approcher leur utilité dans le cadre des microsimulations dynamiques.

2.1 Approche totalement désagrégée

La planification d'importants réseaux de transport, passant par l'évaluation de l'état de l'utilisation du système et la prévision de la demande pour le développement d'alternatives et de leur implantation future, s'appuie depuis le milieu du 20^e siècle sur la procédure séquentielle classique (PSC), aussi appelée méthode à quatre étapes. La planification des transports de plusieurs villes canadiennes, dont les municipalités de l'agglomération montréalaise, se distingue de la procédure classique en utilisant le résultat d'enquêtes-ménages à haut taux d'échantillonnage, représentant environ 5% de l'ensemble des ménages, pour la constitution de la demande de transport. Ces enquêtes origine-destination (OD) réalisées avec la technique d'enquête CATI (computer-assisted telephone interview), c'est-à-dire une entrevue téléphonique et où l'intervieweur est assisté en temps réel d'un logiciel contenant un questionnaire interactif (Chu, Chapleau, & Trépanier, 2009), permettent de dresser le profil des ménages et des membres les composant ainsi que de caractériser leurs habitudes de déplacements grâce à des questions portant sur les déplacements réalisés la journée précédant l'entrevue. La base de données ainsi créée peut être utilisée pour réaliser une affectation totalement désagrégée des déplacements individuels sur un réseau de transport collectif (Chapleau, 1992).

Cette approche « totalement » désagrégée, développée à Montréal avec le logiciel MADITUC (Modèle d'Analyse Désagrégée des Itinéraires de Transport Urbain Collectif) (Chapleau, Allard, & Canova, 1982), propose une approche de modélisation présentant des particularités importantes la distinguant de ses prédécesseurs. Fondée sur les résultats d'enquêtes

OD, elle s'appuie sur les caractéristiques détaillées des individus et de leurs déplacements et elle se différencie en particulier parce qu'elle conserve les attributs des usagers, incluant les données propres à la personne et à son ménage, tout au long de la modélisation et qu'elle n'a recours à aucune agrégation en zones d'activités. En effet, l'origine, la destination (tous deux géolocalisées dans un système cartésien) et diverses informations sur l'itinéraire emprunté se retrouvent parmi les attributs des déplacements. La modélisation est donc réalisée sans perte d'information due à une agrégation, qui peut toujours être réalisée ultérieurement et adaptée à une étude particulière.

Cependant, malgré l'ampleur de ces données et des informations détaillées qu'elles contiennent, il ne s'agit potentiellement plus des données les plus appropriées pour répondre adéquatement à tous les types d'analyse des systèmes de transport collectif.

Effectivement, le potentiel des données de cartes à puce (CAP) à la place des données d'enquêtes est déjà identifié aux débuts des années 2000 (Wofinden, 2003). Chapleau, Trépanier et Chu (2008) résument les difficultés, pouvant être comblées par un système de perception par CAP, des enquêtes OD de répondre aux besoins de planification des réseaux de transport en commun :

- incompatibilité temporelle : le coût considérable des enquêtes entraînent une fréquence de quelques années entre elles alors que le service de transport collectif doit être ajusté plusieurs fois par année.
- échantillonnage insuffisant : les enquêtes ciblant tous les modes de transport et dirigeant parfois l'emphase sur les déplacements automobiles, elles ne représentent pas adéquatement l'usage des transports collectifs.
- niveau de résolution inadéquat : la planification opérationnelle nécessite des données détaillées tant au niveau spatial que temporel.

Le concept de DABI (*driver-assisted bus interview*) (Chu et al., 2009) comme nouvelle méthode d'acquisition de données, soit une entrevue par autobus assistée par le chauffeur, peut donc subvenir aux défauts des enquêtes traditionnelles. À l'instar du CATI, les autobus agissent comme des interviewers interceptant les voyageurs sur le réseau et les transactions représentent des entrevues rassemblant l'information sur l'utilisateur possédant la carte.

2.2 Modélisation à partir de nouveaux ensembles de données

L'émergence et l'amélioration des technologies, avec la production d'immenses flots de données, ont transformé toutes les sphères d'activité de notre société et plusieurs défis de collecte, d'entreposage, de gestion et d'analyse se posent. Les décideurs se doivent de reconnaître l'opportunité de même que les menaces que présente la disponibilité croissante de données. La capacité d'être créatif et proactif dans l'identification du potentiel du big data, d'aborder les enjeux de sécurité et de confidentialité ainsi que d'attirer et de retenir des employés possédant une expertise dans le domaine permettra aux entreprises de créer de la valeur et d'améliorer leur compétitivité (Manyika et al., 2011). Cette révolution est bien présente dans le domaine des transports où la disponibilité de données croît, notamment en raison des capteurs installés dans les véhicules, les appareils mobiles et les infrastructures. Ils génèrent de l'information spatio-temporelle permettant de nouvelles analyses menant ainsi à représenter de manière plus fine et détaillée les comportements de transport (Wolfson & Xu, 2010).

2.2.1 Données de cartes à puce

L'introduction des systèmes ADC (*automatic data collection*), ou systèmes automatiques de collecte de données, par les agences de transport collectif dans leurs équipements de transports collectifs est de plus en plus répandue à travers le monde. À titre d'exemple, on retrouve de plus en plus dans les autobus des systèmes automatiques de localisation (AVL pour *automatic vehicle location*) à l'aide de GPS, des systèmes de comptage automatique de passagers (APC pour *automatic passenger counter*) ainsi que des systèmes de perception des titres de transport (AFC pour *automatic fare collection*). Souvent installés initialement pour un usage spécifique, ces systèmes ADC peuvent être utilisés à plusieurs autres fins et à de faibles coûts marginaux au sein même d'une agence de transport (Zhao, Rahbee, & Wilson, 2007).

Il s'agit particulièrement du cas des données issues des cartes à puce, introduites notamment puisqu'elles interviennent sur la rapidité et la flexibilité du paiement, en améliorant l'intégration des différents titres de transport et en offrant une alternative aux supports de papier (Blythe, 2004). Ces nouvelles données peuvent se révéler très utiles tant au niveau opérationnel que pour la planification à long terme, alors qu'elles sont à la base principalement destinées à la validation et la perception des titres de transport (Pelletier, Trépanier, & Morency, 2011).

Tel que mentionné précédemment, les données issues du processus de validation par CAP peuvent combler certaines lacunes des enquêtes-ménages traditionnelles dans le processus d'estimation de la demande sur un réseau de transport en commun. Alors que certains systèmes requièrent une validation du titre à la montée dans le véhicule (*tap-in*) ainsi qu'au moment de descente (*tap-out*), plusieurs agences n'exigent qu'une seule validation, ce qui empêche l'identification directe des lieux de descente. Cependant, plusieurs algorithmes et méthodes statistiques ont été développés afin de compléter l'information sur les patrons de déplacement et donc de construire des matrices OD fiables à partir de ces données (Chu & Chapleau, 2008; He, 2014; Munizaga & Palma, 2012; Spurr, Chapleau, Chu, & Doucet-Koussaya, 2012; Trépanier, Tranchant, & Chapleau, 2007; Zeng, Reddy, Lu, & Levine, 2015; Zhao et al., 2007)

2.2.2 Données GTFS

Introduit vers la fin de l'année 2006, le GTFS (General Transit Feed Specification) est un format de données standardisé des horaires des systèmes de transport collectif contenant à la fois des informations géographiques sur le réseau. Développé initialement conjointement par Google et TriMet (Tri-County Metropolitan Transportation District of Oregon), il offre la possibilité aux agences de transport de rendre leurs données disponibles pour qu'elles soient intégrées dans l'application Transit de Google Maps (Google, 2014c). Établissant un standard pour l'échange de données des horaires de transport en commun (Ferris, Watkins, & Borning, 2010), le GTFS, avec son caractère uniforme, peut être la source de données de diverses applications créées par des développeurs de multiples horizons (Google, 2014b). On note par exemple TransitApp et Mapnificent. Une de ses forces est d'ailleurs l'explication complète du fonctionnement du système, incluant une documentation exhaustive des fichiers, des attributs et des formats utilisés (Google, 2014a).

L'émergence en Europe d'autres formats standardisés des données d'offre de transport collectif avec TRANSMODEL (ou Modèle de Données Européen de référence pour les opérations de Transport Public) (Cerema, 2013) et NEPTUNE (Norme d'Échange Profil Transport collectif Utilisant la Normalisation Européenne) en France (Normes Données TC, 2014) illustre l'attrait pour la standardisation des données afin de simplifier les échanges et la diffusion d'information.

2.2.2.1 Modélisation de réseau à partir des GTFS

Puisqu'il est adopté par la plupart des agences de transport en Amérique du Nord, le GTFS devient utilisé pour des usages non traditionnels tels que la caractérisation des réseaux de transport collectif pour des fins de planification. Ce format a d'ailleurs servi pour la définition de réseaux de transport collectif et de son service à l'horaire (*schedule-based*) dans le cadre de microsimulations dynamiques. Ce type de définition des horaires s'oppose aux approches statiques basées sur la fréquence de passage des différentes lignes (*frequency-based*), qui minimisent le coût de transport généralisé pour l'utilisateur sans tenir compte de son heure de départ. De plus, il offre un niveau de résolution plus fin permettant de mieux saisir l'évolution temporelle de l'offre de service (Nuzzolo, Russo, & Crisalli, 2001). Des données exprimées dans le format GTFS ont été utilisées pour caractériser le service de transports collectifs pour des applications multimodales de planification (Puchalsky, Joshi, & Scherr, 2012; Sokolov, 2010; Weiss, Mahmoud, Kucirek, & Habib, 2013) ainsi que dans la définition même du réseau et des horaires d'un système de métro pour la réalisation d'une affectation dynamique (Spurr, Chapleau, & Bisailon, 2013).

Son utilisation de plus en plus répandue amène diverses plateformes de simulation à la création de modules convertissant les données GTFS pour en faciliter l'intégration à leur modèle. Le modèle d'affectation pour le transport en commun FAST-TrIPs en fait même sa source de données principale pour la construction de l'offre de service (Khani, 2013).

2.3 Modèles de microsimulation basés sur les activités

L'émergence de nouvelles et riches sources de données ainsi que les avancées technologiques, tant au niveau des logiciels et que des capacités computationnelles, offrent l'opportunité de développer différentes approches de modélisation et favorisent l'approche de la microsimulation. Les modèles de microsimulation sont devenus un nouvel outil permettant de réaliser des représentations réalistes de comportements complexes d'individus, tout en observant les interactions, les contraintes et les mécanismes de décisions guidant leurs actions et leurs choix (Kitamura, Chen, Pendyala, & Narayanan, 2000). Une microsimulation à un niveau de résolution très détaillé permet de suivre chaque objet et son état et d'identifier leurs caractéristiques individuelles. Dans le cas d'un réseau d'autobus, tel qu'il est sujet dans le contexte actuel de ce

projet de recherche, une attention particulière est portée aux véhicules et à leur chauffeur, représentant l'offre de transport, ainsi qu'aux passagers, constituant la demande sur le réseau.

Suite aux premiers développements dans l'élaboration de modèles de microsimulation, créant des modèles d'utilisation du sol représentant les comportements de ménages et d'entreprises dans le choix de leur localisation, un deuxième courant de recherche est caractérisé par l'introduction de modèles basés sur les activités (*activity-based*) (Pendyala, Chiu, & Waddell, 2008). Ces modèles considèrent les horaires spécifiques des individus qui réalisent leurs déplacements entre deux lieux d'activité, qui possèdent donc une origine et une destination localisées sur le réseau. Le résultat d'une modélisation basée sur les activités exprimant dans un tableau chaque déplacement de manière individuelle avec ses propres attributs, la variabilité spatio-temporelle des comportements d'une population est explicitement décrite (Spurr et al., 2012). Un tel niveau de détail permet aux planificateurs et décideurs en transport d'évaluer de manière plus précise les impacts d'une intervention sur le réseau (Castiglione, Bradley, & Gliebe, 2014).

MATSim et TRANSIMS (Transportation Analysis Simulation System) sont deux plateformes de simulation à code source ouvert (*open source*) visant ce type de simulation. Leur modélisation est basée sur des agents (*agent-based*), c'est-à-dire que chaque objet (individu, véhicule, etc.) a une autonomie de contrôle, mais que la modèle tient à la fois compte des objets individuellement et de leurs relations entre eux. Différents modèles avec des perspectives d'analyse très larges ont été développés à l'aide de ces plateformes qui intègrent des éléments dépassant le cadre des simples systèmes de transport, en intégrant des modèles d'interaction avec l'utilisation du sol, des systèmes de mesure d'impacts sur l'environnement, des outils d'analyse économique régionale ou encore en prenant en considération les interactions des horaires individuels d'activité au sein d'un ménage. On note notamment le modèle ILUTE (*Integrated Land Use, Transportation, Environment*) appliqué à la région métropolitaine de Toronto (Salvini & Miller, 2003), le projet ILUMASS (*Integrated Land-Use Modelling and Transport System Simulation*) (Moeckel, Schwarze, Spiekermann, & Wegener, 2007) ainsi que le cas le modèle intégré SimTRAVEL (*Simulator of Transport, Routes, Activities, Vehicles, Emissions, and Land*) (Pendyala et al., 2012).

2.3.1 Simulation dynamique

Ces derniers modèles permettent de réaliser des simulations dynamiques. Comme le décrit Pendyala et al. (2012), un modèle de microsimulation dynamique permet d'obtenir les mêmes types de résultats qu'un modèle traditionnel d'affectation statique, mais en insérant une dimension temporelle. L'ajout du temps rend les simulations plus adaptées à l'émergence et à la disponibilité de quantités croissantes de données. Tant au niveau de l'offre de transport avec les horaires enregistrés sous le format GTFS qu'avec la demande, détaillée au niveau des transactions grâce aux systèmes de perception et de validation par cartes à puce, ces données comportent des variations temporelles. Le caractère dynamique des nouveaux modèles permet une meilleure compréhension des systèmes en facilitant la représentation d'événements et la caractérisation de l'évolution des indicateurs. En effet, en évitant l'agrégation des résultats par période, la perte d'information est réduite et entraîne une analyse plus représentative favorisant une compréhension plus adaptée d'une situation donnée.

2.3.2 Constitution de la demande

Toutefois, les données utilisées pour le montage des différents modèles présentés ci-dessus proviennent soit d'enquêtes sur les habitudes de transport, de recensements ou de matrices OD servant au modèle classique à quatre étapes. Or, tel que mentionné précédemment à la section 2.1, ces données, souvent agrégées en zones, ne représentent qu'un échantillon de la population et nécessitent d'avoir recours à des algorithmes de génération de populations synthétiques afin de construire des données de déplacement au niveau individuel pour la réalisation d'une microsimulation basée sur des agents. Müller et Axhausen (2010) résument à cet effet les pratiques de cette approche. Certains outils, tels que DaySim (Bradley, Bowman, & Griesenbeck, 2010) et OpenAmos (Pendyala et al., 2012), sont de ce fait dédiés à la génération de déplacements individuels issus d'une population de synthèse.

Avec de la demande synthétiquement constituée, ces modèles basés sur les activités ont aussi été exploités dans le cadre d'analyses de systèmes de transport en commun. Ils ont entre autres été utilisés pour l'analyse d'un corridor de système léger sur rail proposé à Phoenix (Volosin, Paul, Pendyala, Grady, & Gardner, 2012) ainsi que pour la simulation à grande échelle

du réseau de transport collectif de la grande région de Chicago (Sokolov, 2010), dans lequel le service était défini par l'intégration des données GTFS.

Les données de cartes à puce, regroupant les transactions de la population totale d'utilisateurs, ont été utilisées dans le but de constituer une demande afin de procéder à des microsimulations basées sur des agents. Bouman (2012) a exploité le potentiel des données CAP pour les introduire dans MATSim avec des données complètes de type « *tap-in/tap-out* ». Cependant, les technologies implantées par les différentes autorités organisatrices de transport ne permettant pas toutes d'identifier directement les lieux de descente, des méthodes d'estimation des destinations peuvent être utilisées pour construire une demande dérivée de données enregistrées à l'entrée seulement. Cette approche a été employée pour l'affectation de la demande pour la réalisation d'une microsimulation dynamique sur un réseau transport collectif le cas du métro de Montréal (Spurr, Chapleau, & Bisailon, 2013; Spurr et al., 2012).

2.4 Défis d'intégration

Les nouveaux ensembles de données très détaillées maintenant disponibles peuvent souvent mener directement et rapidement à la détection et l'analyse d'une situation particulière concernant un service de transport. Or, la puissance de ces données réside dans l'intégration de plusieurs groupes de données cohérents.

D'une part, la mise en commun d'ensembles de données incomplets est parfois nécessaire pour l'obtention d'un tout cohérent. Il s'agit du cas des systèmes ADC qui, pris individuellement, présentent une proportion importante des données ne pouvant être récupérées (Chapleau & Allard, 2010) et leur plein potentiel ne peut être atteint que par l'utilisation de stratégies, notamment en intégrant plusieurs sources de données (Furth, Hemily, Muller, & Strathman, 2006).

Par ailleurs, il arrive qu'une telle intégration mène à la constitution d'un ensemble supérieur à la somme de ses parties. En effet, un traitement et une organisation adéquats d'ensembles de données ainsi joints peuvent guider vers le développement d'outils complets favorisant la composition de nouvelles méthodes d'analyses. Spurr et al. (2012) ont d'ailleurs combiné les données GTFS et les données de cartes à puce pour la réalisation d'un modèle de simulation à un haut niveau de résolution spatio-temporelle fournissant de nouvelles perspectives

d'analyse des éléments de nature opérationnelle et des comportements de transport. Un autre exemple constitue la construction, à partir de données AFC, AVL et GTFS, d'une application déterminant les lieux de montée et de descente pour tous les déplacements, de manière individuelle, sur un réseau de transport de surface (Zeng et al., 2015). L'outil ainsi créé permet de remplacer les traditionnelles observations à bord des véhicules, collectées sur une période de plusieurs années, pour la réalisation d'une planification opérationnelle plus efficace.

De plus, malgré le potentiel offert par les données des systèmes de collecte par cartes à puce, ces derniers ne prennent souvent pas en considération l'aspect socioéconomique des déplacements et, par conséquent, seule l'intégration d'informations complémentaires autorise la constitution d'un ensemble complet favorable à la compréhension globale d'un phénomène (Bagchi & White, 2005).

Bref, en misant sur l'intégration de données déjà disponibles sous la main, donc sans générer de dépenses trop importantes, les décideurs d'une agence se donnent l'opportunité de développer une nouvelle vision d'analyse pour divers projet dans le cadre de la planification. La modélisation du réseau de métro de Montréal pour la réalisation microsimulations dynamiques (Chapleau, 2013; Doucet-Koussaya, 2012) constitue un exemple d'une telle intégration.

2.5 SIG en transport

Les outils de visualisation de données sont essentiels dans le processus d'analyse et de compréhension d'un phénomène. Les systèmes d'information géographique (SIG) sont particulièrement efficaces pour la visualisation interactive et la gestion de données spatiales, comme retrouvées dans le domaine des transports. L'évolution des SIG a accru le nombre de fonctionnalités, permettant de créer des cartes thématiques et de produire des présentations complètes et contrastées, notamment en affichant des étiquettes avec les attributs d'un objet ou en isolant des observations par l'application de filtres (Spurr, Chapleau, & Piché, 2013). L'ajout d'une troisième dimension aux deux dimensions cartésiennes d'un plan a mené à de nouveaux types d'analyse des comportements de transport et a permis entre autres d'ajouter de l'information temporelle à l'illustration des déplacements (Kwan, 2000). L'animation désormais possible des SIG permet d'enrichir la visualisation en faisant intervenir la dimension temporelle,

augmentant la richesse de l'information et offrant ainsi à l'utilisateur le choix du niveau de résolution de son analyse.

De plus, comme le soulignent Spurr et al. (2012), au-delà des fonctions diversifiées de visualisation et d'édition de réseaux, les SIG sont bien adaptés à la simulation détaillée de systèmes de transport. Les éléments sont regroupés par couche et ont des caractéristiques particulières, résumées au Tableau 2-1. Chacune des couches constitue en soi une banque d'information sur le réseau alors que leurs relations entre elles sont fondamentales pour assurer une cohérence et permettre la génération d'une simulation.

Tableau 2-1: Caractéristiques des éléments d'un SIG utilisés pour une simulation de transport

Type de géométrie	point, ligne, polyligne ou polygone
Propriétés esthétiques	taille, couleur, style, etc.
Attributs définissant les paramètres du réseau	longueur du lien, connectivité des liens aux noeuds, capacité des liens, vitesse moyenne, etc.

2.6 Cas : Société de transport de Laval

La Société de transport de Laval (STL) développe et offre un service de transport collectif sur le territoire de la ville de Laval en opérant un réseau d'autobus et de transport adapté. Troisième plus grande ville du Québec et située au nord de l'île de Montréal, Laval compte depuis 2007 trois stations de métro de la ligne orange, opérée par la société de transport de Montréal (STM), qui représente un lien important vers la métropole. Avec ses 44 lignes couvrant une distance totale de 1 371 kilomètres sur l'ensemble territoire de Laval et en partie sur l'île de Montréal (STL, 2015a) pour assurer un service directement jusqu'à certaines stations de métro, la STL représente une agence de transport de taille moyenne. Son budget annuel d'environ 119 millions de dollars lui permet de maintenir 857 employés, dont 553 chauffeurs se partageant une flotte de 270 autobus (STL, 2014), entretenus dans le seul garage situé près de l'intersection de l'autoroute Laval et du boulevard Industriel. Comme l'illustre la Figure 2-1 avec une représentation du réseau routier de la ville de Laval ainsi que du réseau opéré par la STL, cette municipalité est caractérisée par de nombreuses variations de densité sur son territoire.

Le réseau de transport collectif de la STL est organisé à la manière d'un bassin versant dont l'exutoire se trouverait aux stations de métro. En effet, les différentes stations agissant comme points d'entrée au réseau de métro et donc aux destinations situées sur l'île de Montréal,

la totalité des lignes d'autobus (à l'exception de celles traversant un pont pour se rendre directement à Montréal) possède sur leur trajet un arrêt à une station de métro. La plupart d'entre elles ont leur terminus de départ ou d'arrivée aux stations Cartier ou Montmorency, deux stations possédant des stationnements et des aires d'attente pour autobus.

Suite à des ententes convenues avec certaines commissions scolaires, la STL offre, en plus du service régulier, un service de lignes scolaires intégrées. La description de ce service, bien qu'il ne soit pas défini dans l'horaire planifié destiné aux usagers du grand public, est tout de même disponible via le site web de la STL. Ce service en est fonction pour le début et la fin des classes, c'est-à-dire en période de pointe du matin et en après-midi. Les véhicules utilisés pour ce service sont les mêmes que ceux destinés à assurer le reste de l'offre de transport en commun régulier opéré par la STL.

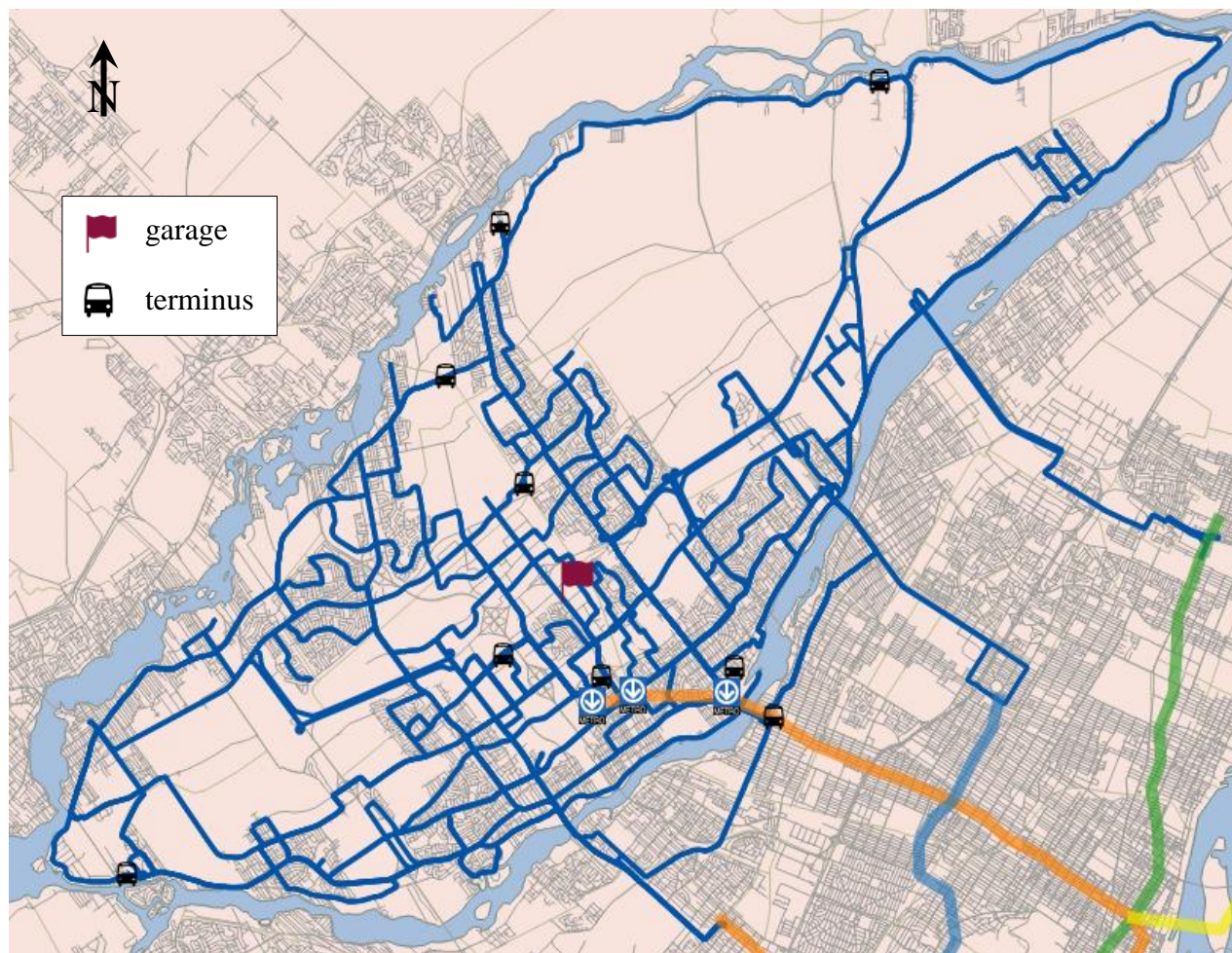


Figure 2-1: Représentation de la ville de Laval et du réseau de la STL

CHAPITRE 3 RÉSEAU DE TRANSPORT DE SURFACE

La présente section a pour objectif d'identifier les éléments constitutifs de l'opération d'un service de transport collectif de surface, tout en décrivant le format dans lequel les données des horaires planifiés sont enregistrées. Ces données serviront de base à l'élaboration d'un réseau de transport pour la réalisation d'une microsimulation.

3.1 Organisation du service et identification des objets

L'organisation opérationnelle du service se reflète dans les données des horaires planifiés destinées à fournir de l'information au voyageur. Dans une compagnie exploitant un réseau d'autobus comme la STL, la définition du service est généralement la même pour tous les jours de la semaine. Le service est décrit par des voyages qui sont organisés en **tournées**, soit une séquence de départs faits par un même véhicule.

Chaque **voyage**, ou départ, est caractérisé par une **ligne**, une **direction**, un **tracé** et une **heure de départ**. Ces quatre éléments constituent l'identification unique d'un voyage. La ligne correspond à l'identification donnée par l'agence de transport à l'itinéraire d'un voyage et la direction permet d'identifier son sens, aller ou retour, parfois exprimée en termes de points cardinaux ou encore selon le terminus de destination. Le tracé représente quant à lui la séquence ordonnée d'arrêts suivie par l'autobus et caractérise donc indirectement la géométrie du trajet emprunté. Une même ligne-direction peut avoir plusieurs tracés pour répondre à des besoins particuliers ou ponctuels variant au courant d'une journée. Les premier et dernier arrêts d'une ligne-direction-tracé en sont les terminus. Enfin, si un voyage suit une ligne-direction-tracé particulière, son heure de départ le rend unique puisqu'il complète le positionnement spatio-temporel du véhicule. La Figure 3-1 schématise l'organisation du service, avec les nombres des différents objets recensés pour une journée moyenne de semaine de la liste d'automne 2013. La sélection de cette période est réalisée en concordance avec les autres ensembles de données utilisés dans le cadre de ce mémoire pour assurer une cohérence. De surcroît, la dernière grande enquête OD conduite dans la grande région de Montréal aussi ayant eu lieu à l'automne 2013, des analyses complémentaires ou comparatives pourraient éventuellement naître.

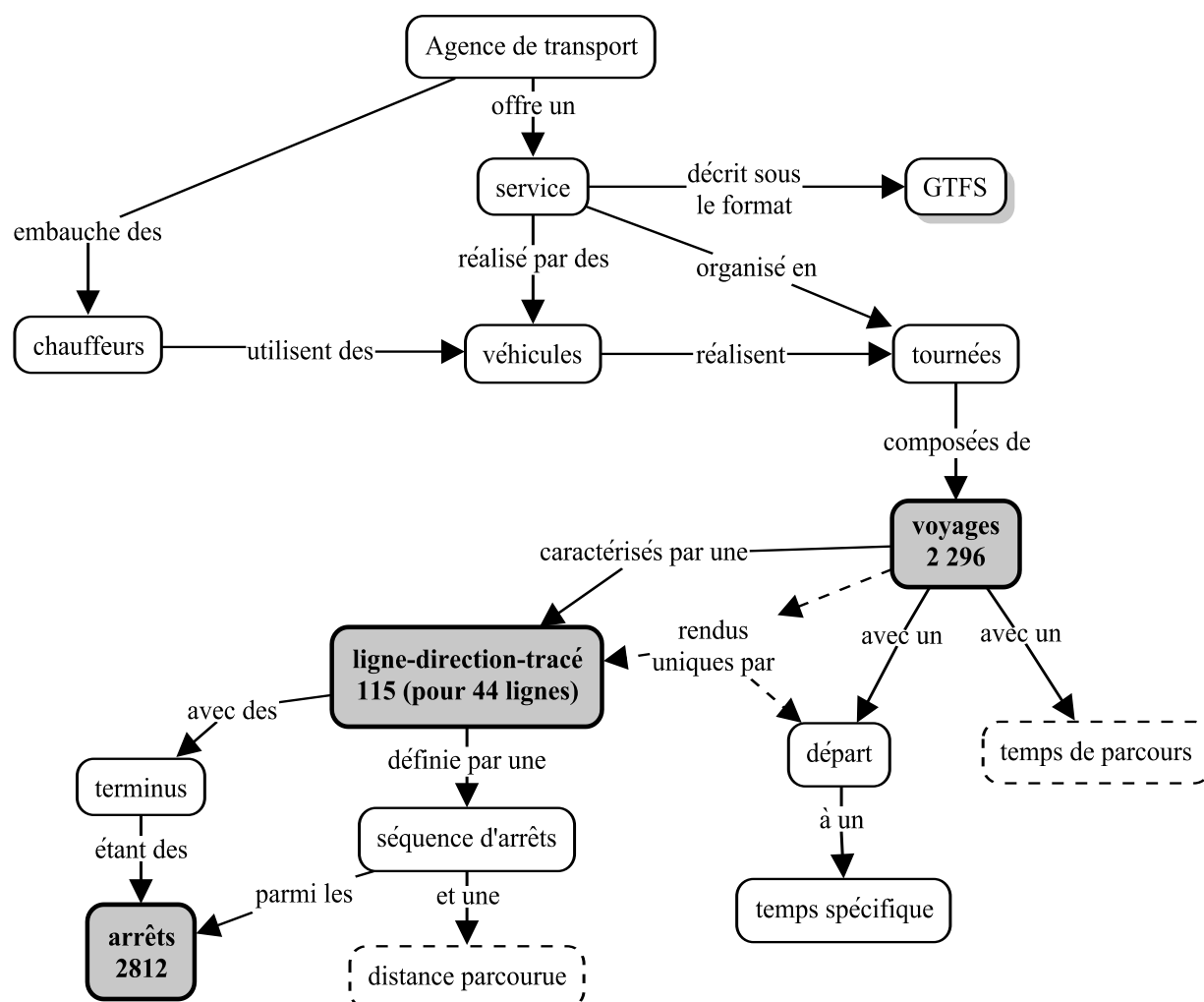


Figure 3-1: Schéma de l'organisation du service

3.2 Format GTFS

Le format de données standardisé GTFS contient de l'information relative à un réseau de transport collectif destiné à l'utilisateur. Ce type de données fournit des informations à caractère géographique et temporel définissant le service planifié. Ces données sont regroupées dans un ensemble de fichiers textes séparés par des virgules compressés dans un fichier « .zip », chacun d'eux regroupant des informations sur des objets différents, dont les principaux sont résumés au Tableau 3-1. La Figure 3-2 présente les différents fichiers utilisés pour décrire les services d'autobus par les principales agences de la région de Montréal.

Tableau 3-1: Résumé des principales tables du GTFS

Table	Description
Agency	Information sur l'agence de transport
Stops	Liste des arrêts et localisation
Routes	Liste des lignes d'autobus
Trips	Liste des voyages
Stop_times	Liste des passages-arrêts incluant l'heure de passage
Calendar	Liste des différents services (semaine, samedi, dimanche)
Shapes	Séquence de points définissant le parcours géométrique d'une ligne

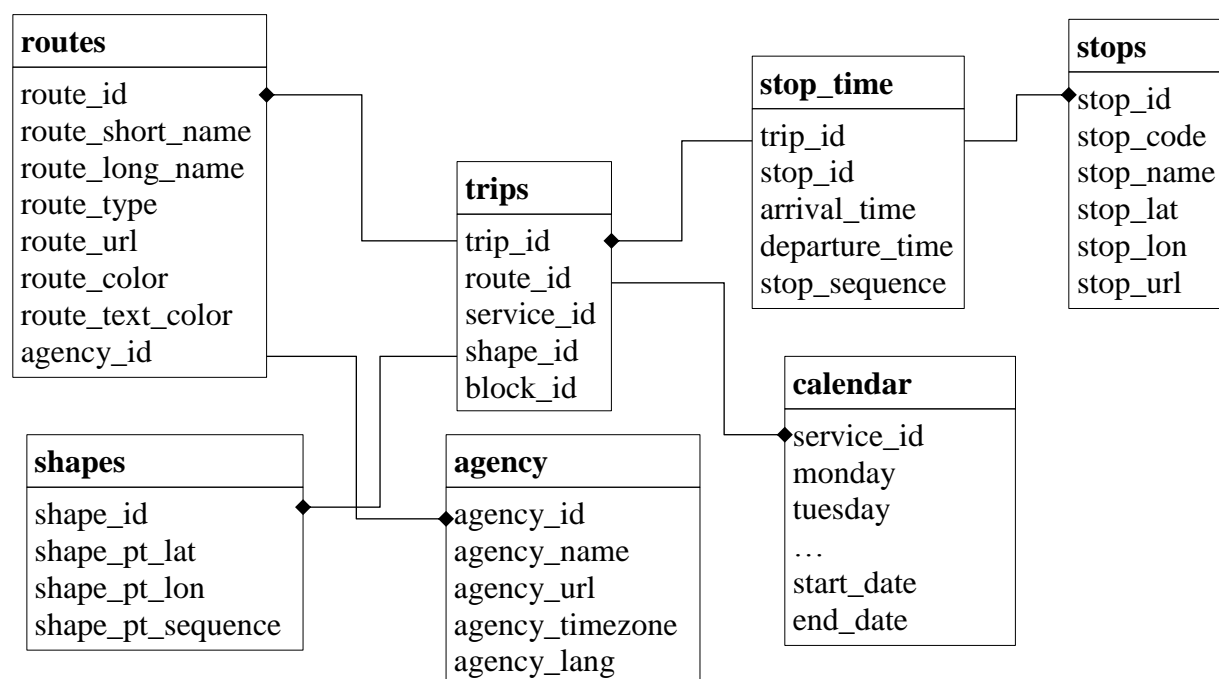


Figure 3-2: Attributs des principales tables du GTFS et les relations entre elles

3.2.1 Structuration du GTFS à la STL

La STL, à l'instar de la plupart des agences de transport, organise son service différemment selon la période de l'année afin de répondre aux variations des besoins des usagers. Cinq listes d'horaires couvrent donc le service annuel. Comme les données GTFS peuvent être utilisées dans plusieurs types d'application, deux listes consécutives sont rendues disponibles pour assurer une continuité de l'information clientèle et ainsi éviter de devoir télécharger une nouvelle version au moment précis où le changement de liste se produit.

Par ailleurs, les besoins des usagers et l'utilisation du service différant d'un jour à l'autre, plusieurs types de service sont opérés par les agences transport. Les données GTFS renferment les particularités de ces variations selon le moment de la semaine, où les passages des véhicules aux arrêts sont définis pour 4 types de jour, soit les jours de semaine (lundi au vendredi, pour lesquelles l'offre de service est la même), le samedi, le dimanche ainsi que les journées fériées. Dans le cadre de ce mémoire, seules les données concernant les jours de semaine seront retenues, puisque la demande y est plus forte en heure de pointe et les ressources mobilisées pour assurer le service y sont donc maximales. Le Tableau 3-2 recense les objets présents dans le GTFS de la STL étudié¹.

Tableau 3-2: Recensement des objets présents dans le GTFS (jour de semaine, liste d'automne 2013)

Objet	Identifiant unique	Nombre
arrêts	stop_id	2 812
lignes	route_id	44
lignes-directions-tracés		115
voyages	trip_id	2 296
passages aux arrêts	trip_id – stop_id	134 440
assignations à des chauffeurs	block_id	334

3.2.1.1 Sémantique des identifiants

Bien que la définition même du format oblige la présence de certains attributs et impose parfois un format, les agences de transports délivrant leurs données GTFS bénéficient d'une certaine latitude en ce qui a trait à la nomenclature de plusieurs identifiants. En effet, l'identification des lignes, des voyages ainsi que des arrêts est laissé libre au concepteur. Un choix judicieux de leur format permet d'enrichir les données et facilite la compréhension et l'analyse du système. Chaque agence peut avoir son propre format de définition. Le Tableau 3-3 décrit les formats d'identificateurs utilisés par la STL dans son fichier GTFS.

¹ Initialement, le fichier GTFS contenait 2 303 voyages et 135 440 passages aux arrêts. Or, 7 voyages étaient présents en double, c'est-à-dire que la séquence d'arrêts et leurs heures de passage étaient identiques. Suite à une communication avec un employé de la STL, ces doublons ont été éliminés des données, d'où les nombres inscrits au Tableau 3-2.

Tableau 3-3: Décomposition des identifiants uniques du GTFS de la STL

Id	Objet	Exemple	Segmentation	Explication
stop_id	arrêt	AOUT13 41005	AOUT13	Liste
		AOUT13 CP 20011	CP	Point de contrôle (1)
			41005	<i>stop_code</i>
route_id	ligne	AOUT13 12 E	AOUT13	Liste
			12	Ligne
			E	Direction
trip_id	voyage	AOUT13 12E2 L104 1301 0019	JANV13	Liste
			12E2	Ligne-Direction- Tracé
			L104	<i>Block</i> (tournée) (2)
			1301	Fin du trajet (3)
			0019	Ordre de départ (4)

- (1) L'arrêt est un point de contrôle s'il porte la mention « CP ». Tous les arrêts des débuts et des fins d'un voyage comportent « CP » dans leur stop_id.
- (2) L'identifiant du *block* est composé d'une lettre suivie d'un nombre, la lettre correspondant à la journée de la semaine (L=semaine, S=samedi, D=dimanche). Dans les données étudiées, 26 *blocks* débutent par la lettre « X ». Ceux-ci correspondent à des *blocks* préparés par le service d'opération, en aval du processus de planification, pour répondre à des besoins particuliers, par exemple en raison d'un achalandage élevé ou encore pour retirer un voyage d'une assignation trop longue.
- (3) Sous le format HHMM, il s'agit de l'heure de passage au dernier arrêt du voyage, additionnée d'une minute
- (4) Ordre de départ du voyage dans la journée
 - a. 00## : semaine
 - b. 03## : samedi
 - c. 05## : dimanche

Le format GTFS permet, de manière facultative, l'utilisation du champ *block_id* pour identifier « la séquence consécutive de voyages réalisés par un même véhicule » (Google, 2014a, traduction libre), soit la notion de tournée. Or, la STL utilise cet attribut pour identifier un concept différent; le *block_id* correspond plutôt à un numéro d'assignation à un chauffeur. Il est fort probable qu'un même véhicule réalise des voyages consécutifs appartenant au même *block_id*, mais ce n'est pas forcément le cas de tous les voyages d'un *block*, puisqu'un chauffeur peut changer de véhicule au cours de sa période de travail, notamment suite à une pause, durant laquelle un changement de chauffeur pourrait être effectué pour conserver le véhicule en service commercial. Ainsi, dans le cadre de ce mémoire, le terme « tournée » sera utilisé pour désigner une assignation à un chauffeur.

Le format GTFS propose aussi un champ descriptif pour définir le nom de l'arrêt. Les arrêts du GTFS produits par la STL sont nommés de manière à décrire la position de l'arrêt en mentionnant le nom de la rue sur laquelle l'autobus circule, accompagné de la rue transversale, ou le lieu où il se situe, par exemple à un terminus. Ce type de description ne permet l'identification unique d'un lieu, par exemple lorsqu'un croissant croiserait deux fois la même rue.

3.2.2 Enrichissement et uniformisation

Un enrichissement du format de données GTFS lui permettrait de devenir un outil de planification et ne plus simplement répondre à un besoin d'information pour le voyageur. Il pourrait rassembler l'ensemble des informations permettant de comprendre et d'analyser le fonctionnement du réseau de transport de surface. De plus, le format GTFS, déjà bien répandu et utilisé par les principales agences de transport de la région de Montréal, devrait être uniformisé afin de faciliter leur intégration dans un système commun de planification. Une telle modélisation des systèmes de transport de surface à grande échelle permettrait de comprendre et d'analyser les interactions entre les différents réseaux. Un extrait d'un fichier *stop_times* enrichie est présenté à l'Annexe A.

3.2.2.1 Ligne-direction-tracé

Puisque quelques tracés seulement sont possibles pour chaque ligne-direction, la connaissance du tracé des voyages permet de compresser le format GTFS tout en évaluant les ressources nécessaires pour chaque ligne. Ce format réduit peut résumer efficacement les voyages planifiés en comprenant entre autres, pour chaque ligne-direction-tracé, le nombre de voyages réalisés, le nombre d'arrêts et la distance parcourue.

En plus de la ligne et de la direction, la nomenclature des attributs diffusés dans les données GTFS devrait comprendre explicitement le tracé d'un voyage, bien qu'il peut être dérivé de la séquence d'arrêts parcourus contenue dans le fichier *stop_times.txt*. L'identifiant du tracé, qui pourrait être inclus dans l'identification du voyage ou par un autre nouvel attribut, enrichit l'information contenue dans le GTFS puisque c'est celui-ci qui caractérise la géométrie d'un voyage. Cette information améliore par le fait même la capacité de ces données à servir d'outil dans un cadre de planification.

3.2.2.2 Points de contrôle

Un élément utilisé par les agences de transport afin d'assurer la ponctualité du service est le point de contrôle. Un arrêt peut agir en tant point de contrôle, signifiant que le chauffeur devrait ajuster sa vitesse pour respecter l'horaire planifié à cet endroit, y restant immobile s'il est en avance. Bien que ces lieux soient intéressants puisqu'ils représentent des points de « certitude » quant à la position spatio-temporelle d'un véhicule, le format GTFS ne requiert aucun attribut permettant de distinguer cette information à caractère opérationnel.

Pour permettre cette différenciation, certaines agences, comme la STL, ont modifié l'identifiant unique de certains arrêts pour y inclure la mention « CP » (*checkpoint*). Il est à noter qu'avec des systèmes en temps réels, indiquant au chauffeur via la console sa ponctualité à chaque arrêt, ces lieux deviennent de moins en moins requis au niveau des opérations.

3.2.2.3 Horaire à la seconde

Les horaires tirés des données GTFS visant à la base à fournir de l'information à l'utilisateur, il est normal que les agences de transport comme celles de la région de Montréal ne fournissent pas des heures de passage plus précises qu'à la minute près pour leur service d'autobus, particulièrement si la norme pour une ponctualité acceptable est de cinq minutes en retard comme à la STL². Or, en raison de ces approximations, il arrive que deux arrêts rapprochés consécutifs d'un même trajet aient le même temps de passage. Dans un contexte de modélisation, il est incohérent qu'un objet, en l'occurrence un autobus, puisse se trouver en deux lieux au même moment; il s'avère donc essentiel d'enrichir l'horaire pour définir une plus grande précision et de proposer un horaire à la seconde.

Pour y parvenir, le concept de point de contrôle mentionné à la section 3.2.2.2 sera utilisé. En effet, il sera supposé qu'un autobus se trouve au point de contrôle et au dernier arrêt d'un trajet à l'heure indiquée dans l'horaire GTFS. Pour l'horaire des arrêts intermédiaires, une interpolation basée sur la distance entre deux arrêts sera réalisée (Figure 3-3). Cette dernière s'appuie sur l'hypothèse d'une uniformité relative de la trame urbaine entre deux points de

² La ponctualité acceptable à la STM est d'une minute en avance et de trois en retard.

contrôle. Cette interpolation est calculée à partir des points de géométrie de la ligne contenus dans le fichier « shapes.txt » s'il existe³, et à vol d'oiseau entre les arrêts dans le cas contraire.

Le besoin d'identification des points de contrôle permet ainsi de comprendre la nécessité d'uniformiser la structure des identifiants d'arrêt afin faciliter l'automatisation et l'intégration des données provenant d'agences de transport multiples.

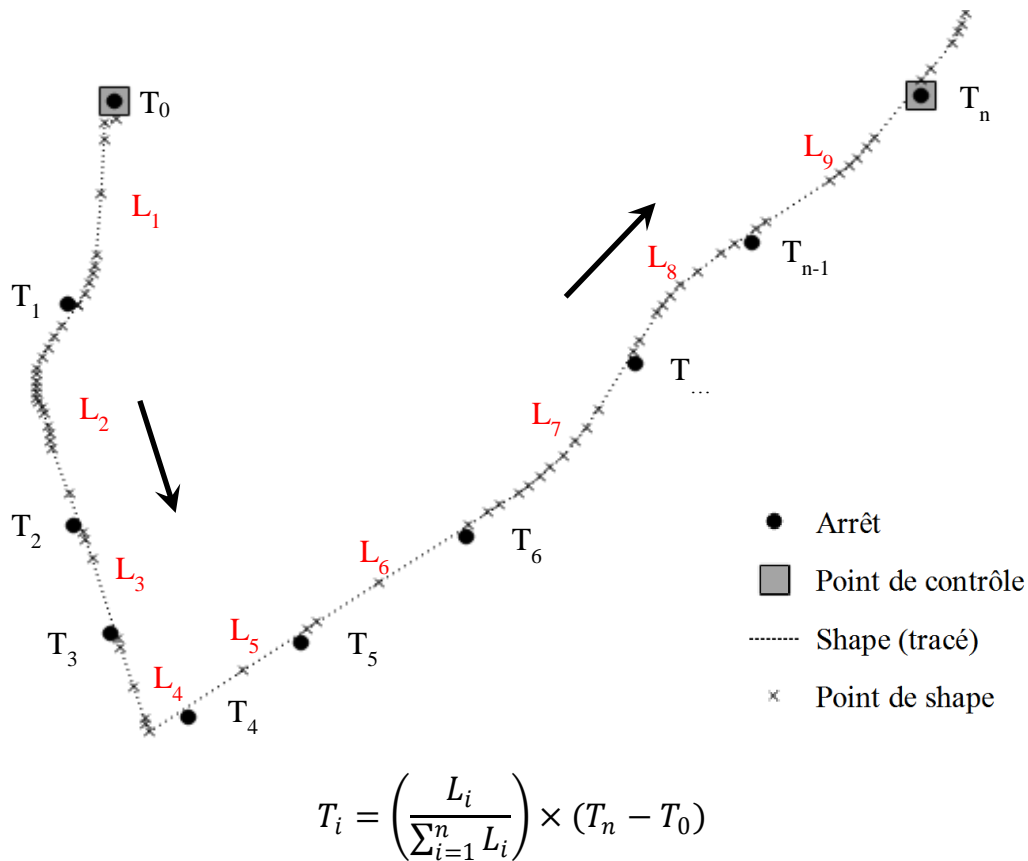


Figure 3-3: Génération d'un *stop_times* « à la seconde »

3.2.3 Portrait et évaluation des ressources

Puisque les données GTFS rassemblent les données des horaires planifiés, il est possible d'évaluer les ressources impliquées dans l'offre de service. Ne contenant pas l'ensemble des informations opérationnelles, tels que les battements et les haut-le-pied (HLP), seuls les

³ À la STL, les *shapes* sont définis seulement pour le tracé principal d'une ligne-direction.

ressources concernant le service commercial peuvent être appréciées. La dérivation des distances inter-arrêts à partir de la géométrie (*shapes*) permet d'estimer que 37 337 véh-km⁴ sont parcourus en service lors d'une journée moyenne de semaine, tandis que les temps de passages aux arrêts révèlent 1 518 véh-h productifs opérés. La segmentation par période de la journée (Tableau 3-4) montre qu'environ la moitié des ressources est consacrée aux périodes de pointe, soit environ 30% de la plage temporelle d'offre de service.

Tableau 3-4: Ressources (véh-h et véh-km) utilisées segmentées par périodes

	période									
	début	fin			véh-h		véh-km			
	04:32:00	05:59:59	<div><div></div></div>	6.4%	<div><div></div></div>	38.3	2.5%	<div><div></div></div>	1022.4	2.7%
pointe AM	06:00:00	08:59:59	<div><div></div></div>	13.1%	<div><div></div></div>	334.9	22.1%	<div><div></div></div>	8124.6	21.8%
	09:00:00	14:59:59	<div><div></div></div>	26.2%	<div><div></div></div>	422.8	27.8%	<div><div></div></div>	10198.3	27.3%
pointe PM	15:00:00	18:59:59	<div><div></div></div>	17.5%	<div><div></div></div>	424.7	28.0%	<div><div></div></div>	9882.3	26.5%
	19:00:00	27:24:00	<div><div></div></div>	36.7%	<div><div></div></div>	297.6	19.6%	<div><div></div></div>	8109.6	21.7%
total	04:32:00	27:24:00		100.0%		1518	100.0%		37337	100.0%

Les véhicules assurant le service régulier étant aussi utilisés pour soutenir le service scolaire, il convient de tenir compte de ces voyages. La distribution temporelle du nombre de véhicule en service, exposée à la Figure 3-4, montre la répartition du service avec une pointe PM plus étalée que celle de la période AM, notamment en raison de la fin des classes se trouvant plus tôt que le retour de la majorité du reste de la population. C'est donc un maximum de 180 véhicules en service en même temps sur le réseau desservi par la STL qui constitue la flotte au plus fort de la période de pointe matinale. Le niveau de résolution des données à la minute a pour effet de produire une représentation vacillante du nombre de véhicule en service, en raison de l'illustration du service productif seulement.

⁴ Le calcul réalisé à partir des distances à vol d'oiseau entre les poteaux conclut au parcours de 35 031 véh-km pour un jour moyen de semaine, soit une distance d'un peu plus de 6% inférieure à celle obtenue avec la géométrie contenue dans le fichier *shapes.txt*.

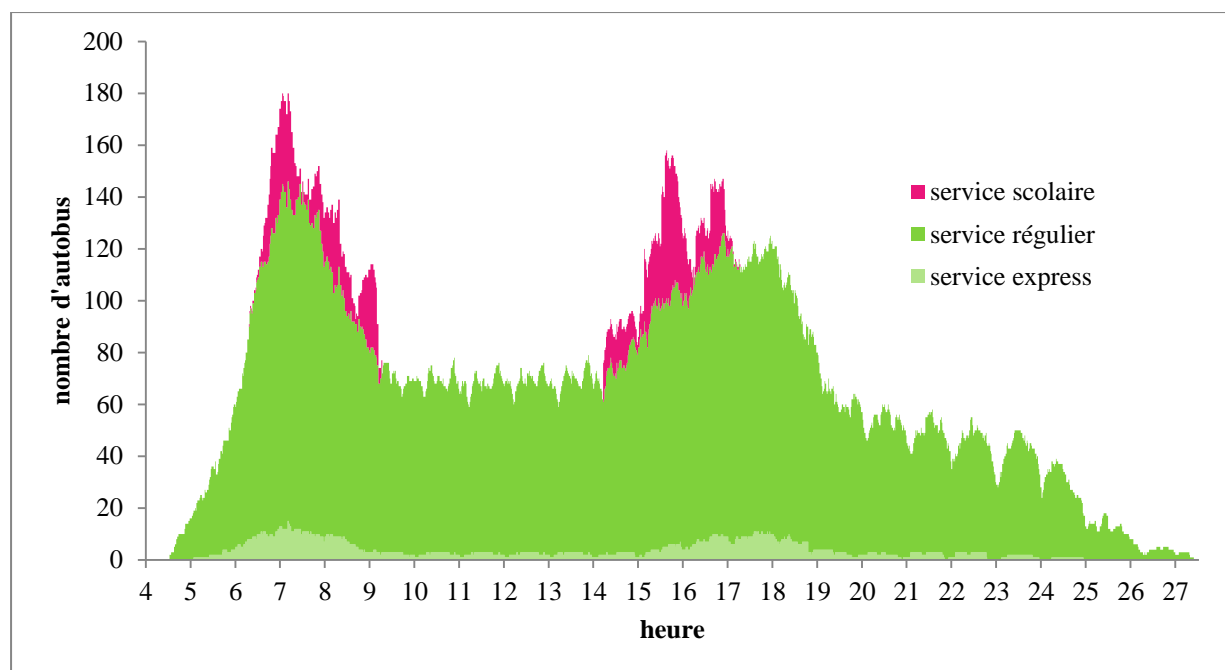


Figure 3-4: Distribution temporelle du nombre de véhicules en service commercial

D'un point de vue géographique, le service n'est pas réparti de manière égale sur l'ensemble du réseau. En plus de considérer la distribution du réseau routier (Figure 2-1), il suffit d'observer le nombre de passages aux arrêts pour une journée entière selon les différents secteurs municipaux, comme à la Figure 3-5, pour constater que le service se rabat sur la partie centrale, où se trouvent notamment les trois stations de métro. L'ajout de lignes illustrant le nombre de voyages partant d'un secteur et se destinant vers un autre montre l'organisation spatiale du service. En période de pointe du matin, une proportion dominante des voyages mène les usagers vers le métro, alors que la situation inverse se produit en fin de journée.

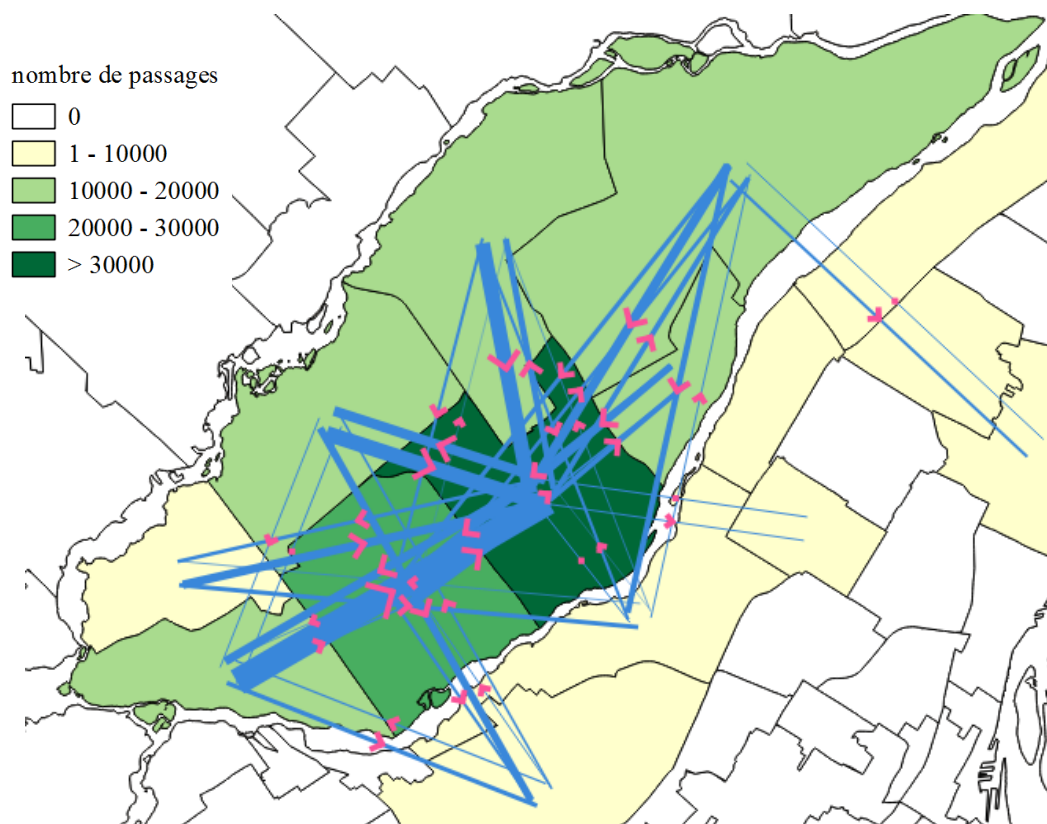


Figure 3-5: Illustration des origines et des destinations des voyages débutants entre 5:00 et 9:00 selon les secteurs municipaux ainsi que le nombre de passages aux arrêts

CHAPITRE 4 DEMANDE

Dans un objectif de microsimulation pour des fins de planification, les efforts de construction et de modélisation de réseau n'atteindront leur pleine utilité que si une demande convenable et la plus représentative de la réalité peut être établie. Tel que mentionné précédemment, de nouvelles sources de données issues des progrès technologiques comme les systèmes de perception par cartes à puce se révèlent être plus adéquat dans la composition d'une demande plus juste. L'objectif est donc d'effectuer un traitement de données de CAP pour reconstituer des déplacements, c'est-à-dire définir spatio-temporellement les origines et localiser leur destination. Ce chapitre explore donc un jeu de cartes à puce avant d'explorer une méthode visant à estimer les paires OD des usagers pour enfin apprécier la richesse des informations ajoutées.

4.1 Système de perception des titres de transport

4.1.1 Fonctionnement

Bien qu'il présente un potentiel pour des fins de planification, le système de cartes à puce sert d'abord et avant tout à percevoir les titres de transport des usagers. Introduite à l'automne 2008, la carte OPUS est une carte rechargeable utilisée par plusieurs agences de transport en commun au Québec, incluant la STL. Nécessitant une photo pour bénéficier du tarif réduit accessible aux enfants, aux étudiants et aux personnes âgées, elle a été implantée afin de mieux contrôler les recettes tout en visant à réduire la fraude (STL, 2015b).

Dans le système d'autobus de la STL, tous les passagers doivent valider leur passage à l'aide de leur carte OPUS ou avec de l'argent comptant en monnaie exacte. La détection du support, ou la validation du titre de transport, à un endroit du réseau constitue une **transaction**. Des exceptions s'appliquent aux enfants de moins de six ans pour qui le service est gratuit, de même que pour les enfants de moins de douze ans les jours de fin de semaine, les jours fériés et tout l'été lorsqu'accompagné d'un adulte (STL, 2015c). Des potentiels dysfonctionnements des boîtes de perceptions installées dans les autobus sont aussi possibles, les utilisateurs ne pouvant valider leur titre. Il est donc à noter que ces usagers n'apparaîtront pas dans l'historique des transactions et ne seront donc pas comptabilisés dans une estimation de l'achalandage à partir du

système AFC. Une fois la première transaction enregistrée dans un autobus, il est possible d'effectuer des correspondances sur le réseau de la STL pour une période de 90 minutes, en validant le titre à chaque fois. Une correspondance n'est pas possible entre deux véhicules parcourant la même ligne, ni entre deux réseaux différents, à moins d'avoir en sa possession un titre intégré de type TRAM, permettant l'accès aux réseaux de train de banlieue, d'autobus et de métro.

La connaissance des **chaînes de transactions** effectuées, soit la suite des transactions ordonnées temporellement réalisées dans une journée par un même support, joue un rôle important dans l'estimation des lieux d'origine et de destination des déplacements. Plusieurs titres de transport différents peuvent être utilisés sur le réseau de la STL. Bien que la plupart doivent être chargés sur une carte OPUS, il n'est pas toujours possible d'associer à un usager toutes les transactions qu'il a réalisé et ainsi de le « suivre » dans ses déplacements. D'une part, si la transaction est réalisée en argent comptant, même si un billet est émis pour permettre des correspondances, aucun moyen ne permet d'identifier le même usager plus tard au courant de la même journée. D'autre part, un changement de titre est nécessaire pour passer d'un réseau à un autre, pour les utilisateurs ne possédant pas de titre TRAM, par exemple pour correspondre d'un autobus au réseau de métro. En effet, si plusieurs titres peuvent être chargés sur une même carte OPUS, il n'est pas obligatoire de le faire puisque d'autres supports sont aussi acceptés sur les autres réseaux comme les billets individuels et les cartes occasionnelles non rechargeables. L'utilisateur utilise donc dans ce cas plus d'un support à identification unique, éliminant la possibilité de capturer directement sa suite de déplacements. L'emploi d'un titre en particulier aura ainsi un impact sur la capacité de traquer l'utilisateur dans ses mouvements en transport en commun lors d'une journée.

4.2 Ensemble de données

L'ensemble de données disponible et utilisé pour les expérimentations est constitué à partir des transactions de la journée du jeudi 12 septembre 2013. Il contient l'ensemble des transactions enregistrées dans la région métropolitaine de Montréal, tous opérateurs confondus, par tous les supports ayant été utilisés pour au moins une transaction sur le territoire de la ville de Laval, c'est-à-dire sur le réseau d'autobus de la STL ou à une des trois stations de métro lavalloises. Ces 180 343 transactions sont organisées dans une base de données où plusieurs

attributs rassemblent de l'information sur chacune d'entre elles. L'information de ces objets provient des différents instruments installés dans le véhicule, notamment la girouette et la boîte de perception dans laquelle la transaction a été compositée. L'ensemble des données consignées dans cette boîte est ensuite téléchargé une fois de retour au garage et stocké dans un serveur géré par la STM où toute l'information des systèmes de perception est rassemblée. Le Tableau 4-1 rassemble les principales informations enregistrées par les boîtes de perception ainsi que certains objets pouvant être dérivés pour enrichir le système et améliorer le potentiel d'analyse. À chaque transaction réalisée dans un autobus sont associés un numéro de ligne et une direction. Ces informations proviennent des renseignements enregistrés et diffusés par la girouette du véhicule (Figure 4-1). Il à noter que l'information contenue dans la girouette doit être inscrite par le chauffeur au début de chaque voyage. Les résultats pouvant en être tirés sont donc tributaires d'une intervention humaine et sujets à certains oublis ou erreurs d'entrée. Pour cette raison, la direction du véhicule ne sera pas considérée pour les analyses, seul le numéro de la ligne étant conservé. L'hypothèse que cette information est fiable est posée, tout en étant conscient d'erreurs potentielles, particulièrement en début de trajet.

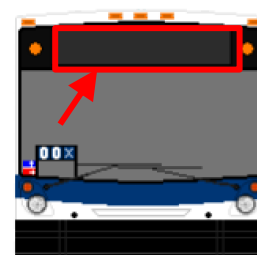
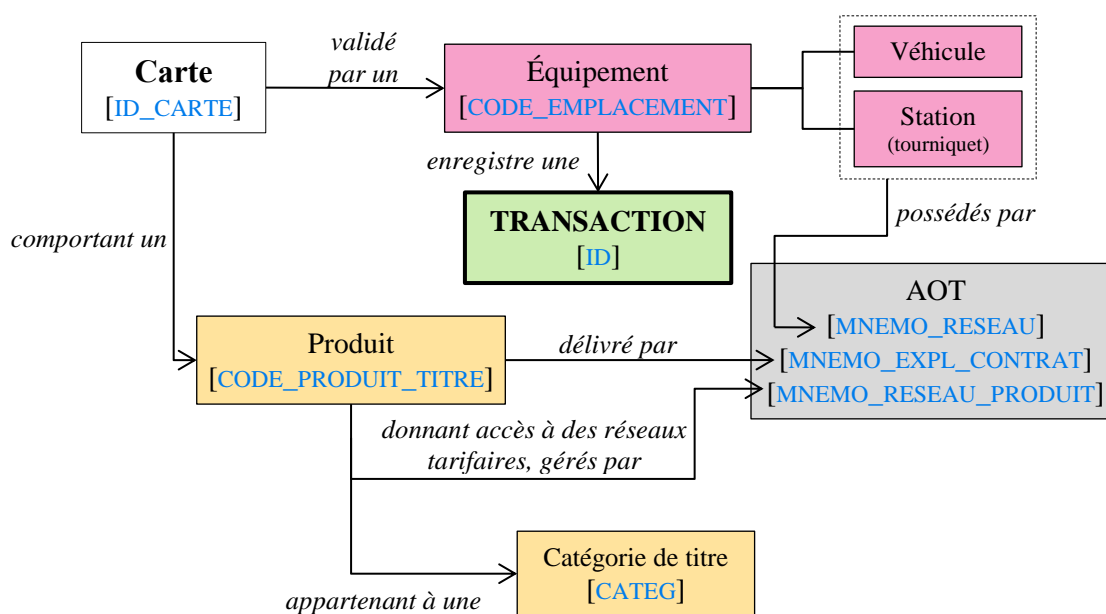


Figure 4-1: Girouette d'un autobus



[ABC] : Attribut du fichier de transactions

Figure 4-2: Schéma des objets dans le fichier de transactions

Tableau 4-1: Information sur les transactions contenue dans la base de données

Attribut		Description
ID du support	Données directes	Identification unique de la carte
Heure		Heure de validation du titre
Type de validation		Type de transaction : 1 Première transaction d'un déplacement, donc la première montée ou la transaction dite "payante" 3 Transaction de correspondance 2 Première transaction réalisée avec un titre forfaitaire (un jour, 3 jours, etc.), les suivantes étant de type 3
Code d'emplacement		Identifiant unique de l'équipement où la transaction a eu lieu : <i>autorité organisatrice de transport</i> ⁵ (AOT) avec son <i>véhicule</i> ou son <i>tourniquet</i> si station de métro
Ligne		Ligne d'autobus réalisée par le véhicule au moment de la transaction
Type d'équipement		Identification du type d'équipement : Boîte de perception (BP) Tourniquet (métro) (TE) Vantaux (métro) (PV)
Titre		Titre de transport utilisé pour la transaction
Type de validation corrigé	Données dérivées	Correction du type de transaction (voir section 4.2.2.1)
Déplacement		Identification du déplacement auquel appartient une carte à partir du type de validation
Catégorie de titre		Division des titres en catégories ordinaire / régulier forfait / unitaire jour / autre

(voir l'Annexe B pour un extrait du fichier de transactions)

4.2.1 Convergence vers le métro

Comme mentionné plus tôt, le métro occupe une place importante dans le système de transport en commun de la ville de Laval. Lors de la journée étudiée, 34 692 transactions ont été réalisées à une des trois stations de métro de Laval, représentant un peu plus de 30% de l'ensemble des transactions effectuées sur le territoire lavallois. L'accent étant porté sur l'analyse d'un réseau de transport de surface d'une agence de taille moyenne, seuls **les supports dont au moins une transaction a été réalisée sur le service régulier du réseau de la STL seront**

⁵ code 32 : STM / code 36 : STL

retenus (Figure 4-3) pour la présente analyse, notant néanmoins l'intéressant potentiel de l'ensemble complet de données par exemple dans l'analyse de l'achalandage complet d'une station de métro. Le type service (régulier ou scolaire) offert au moment de la validation du titre n'étant pas directement spécifié, il est supposé qu'une transaction est effectuée en service régulier lorsque le numéro de la ligne enregistrée dans la girouette correspond à une des lignes planifiées inscrites dans le GTFS.

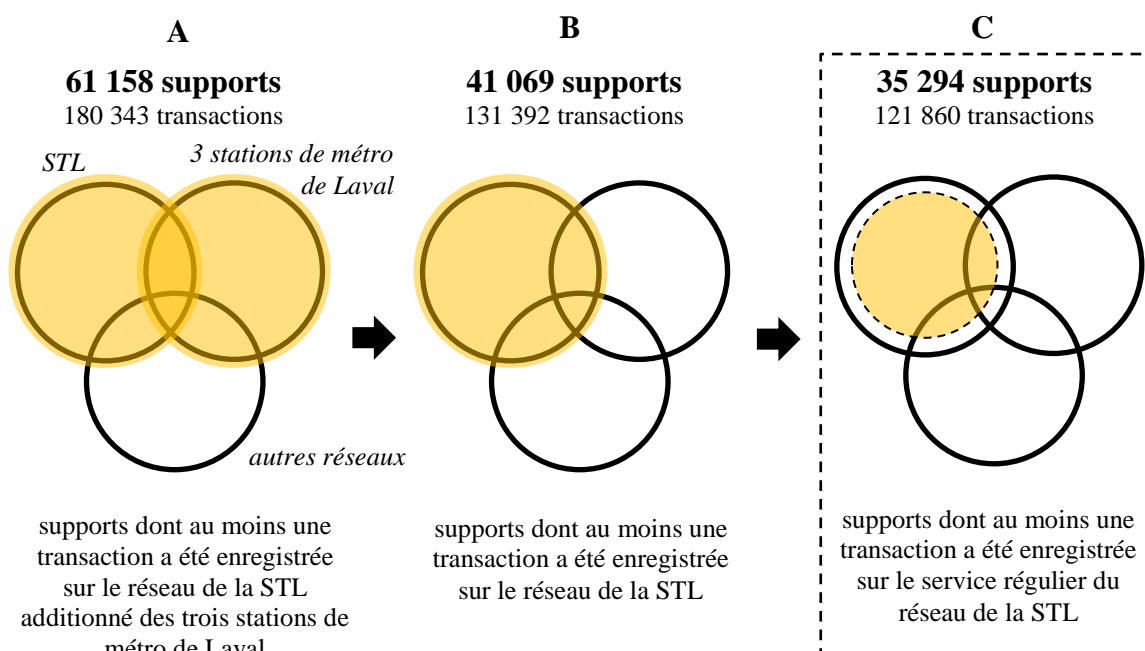


Figure 4-3: Nombre de supports selon les réseaux touchés

L'ensemble étudié représente 68% des transactions de l'échantillon initial, pour un total de 121 860 enregistrements réalisées par 35 294 supports, contribuant à plus de soixante-dix mille déplacements. Le métro occupe un rôle notable avec 29% de ces transactions, dont 11% pour les trois stations lavalloises Cartier, De la Concorde et Montmorency. En ce qui concerne le service régulier de la STL, 68 808 transactions de 59 338 déplacements sont effectués sur 215 véhicules. La répartition des transactions selon les réseaux où les transactions ont eu lieu est résumée à la Figure 4-4, alors que le Tableau 4-2 montre la répartition des types de support et des tarifs utilisés pour les transactions enregistrées sur le réseau régulier de la STL. La majorité des supports (31 712) utilisés sont des cartes suivables, c'est-à-dire que la séquence de transactions peut être étudiée sur plusieurs déplacements, ce qui n'est pas le cas des cartes magnétiques, utilisables que pour un seul déplacement. De plus, il est à retenir que 55.4% des transactions sont

complétées avec un titre TRAM permettant d'accéder aux réseaux communs, alors que les autres titres utilisés sont propres à la STL.

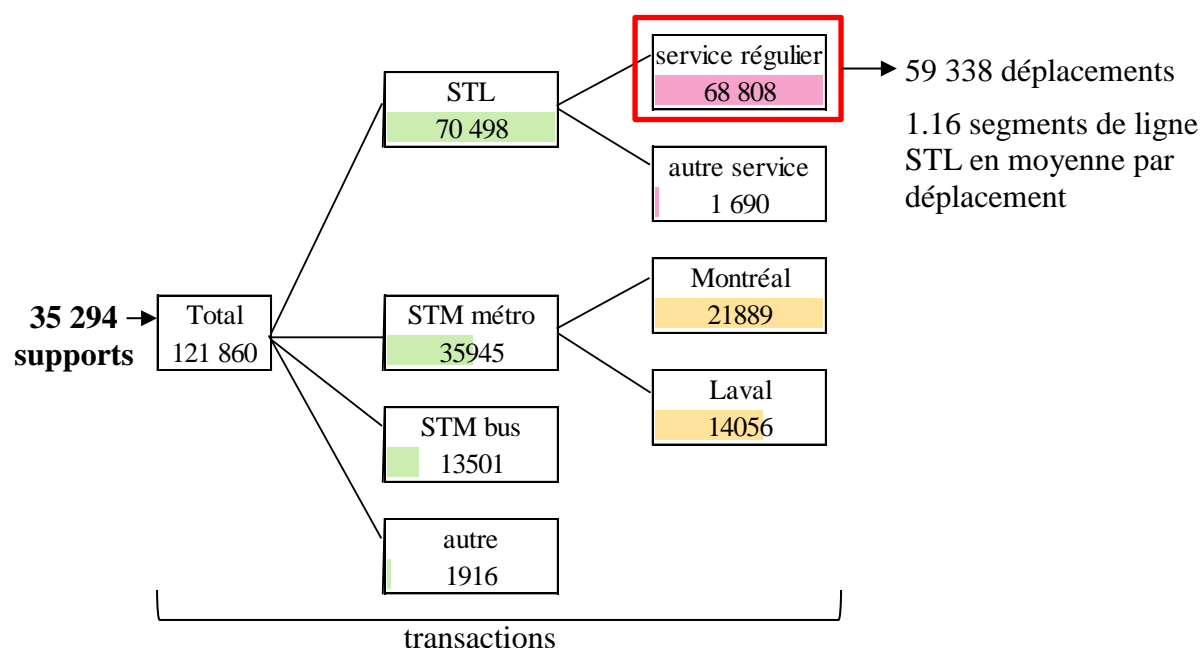


Figure 4-4: Distribution des transactions dont les supports ont effectué au moins une transaction sur le service régulier de la STL

Tableau 4-2: Titres pour les transactions effectuées sur le réseau régulier de la STL (68 808 transactions)

Type de support	Nombre de supports	Nombre de transactions	Tarif	Nombre de transactions
Cartes suivables	31 712	63 942	Ordinaire	30 330
Carte OPUS rechargeable	31 708	63 934*		
Carte non-rechargeable	4	8		
Carte magnétique	3 582	4 886	Réduit	33 148
1 déplacement par carte			Autres	5 330

*38 121 transactions sont réalisées avec un titre TRAM

La Figure 4-5 illustre la distribution de l'achalandage en distinguant l'ensemble des transactions de celles correspondant à la validation initiant un déplacement. Cette différenciation valide l'usage que fait une importante proportion des usagers du réseau de la STL, c'est-à-dire pour atteindre le métro pour se destiner vers Montréal.

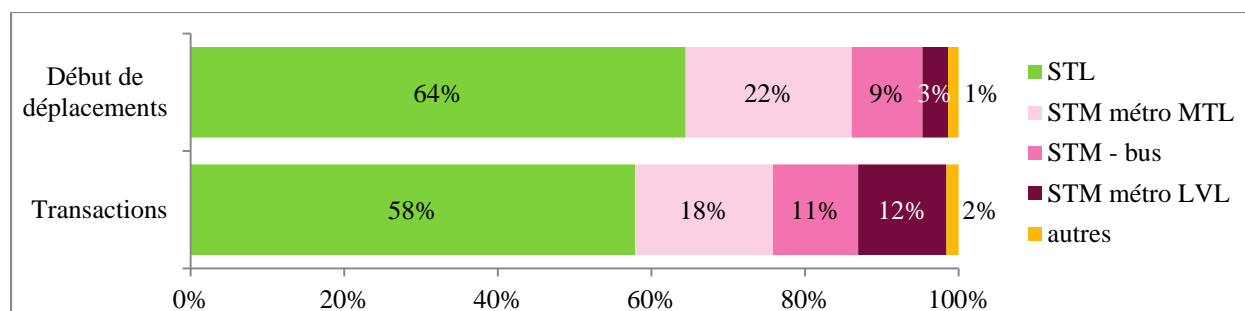


Figure 4-5: Répartition de l'utilisation des réseaux (nombre total de transactions et nombre de transactions de type d'opération 1)

Quant à elle, la Figure 4-6 montre la distribution temporelle des transactions, séparées en fonction du réseau emprunté et regroupées par périodes de 10 minutes. Pour les transactions réalisées sur le réseau d'autobus de la STL, l'heure de pointe du matin est un peu plus courte et plus concentrée que celle de l'après-midi, cette dernière s'étalant sur une période d'environ quatre heures, de 14 h 30 à 18 h 30.

La distinction des trois stations de métros situées à Laval par rapport au reste des stations illustre les mouvements pendulaires des usagers. En période matinale, l'entrée aux stations de métro se fait beaucoup à Laval pour se diriger vers les lieux d'emplois situés dans la ville de Montréal. Une transition s'observe ensuite en fin de journée où le nombre d'entrées aux stations lavalloises devient inférieur à celui sur le reste du réseau puisqu'on imagine les usagers partant de l'île de Montréal pour retourner vers leur domicile. La somme des transactions sur le réseau opéré par la STM indique un profil plus symétrique et similaire à celui du réseau de la STL.

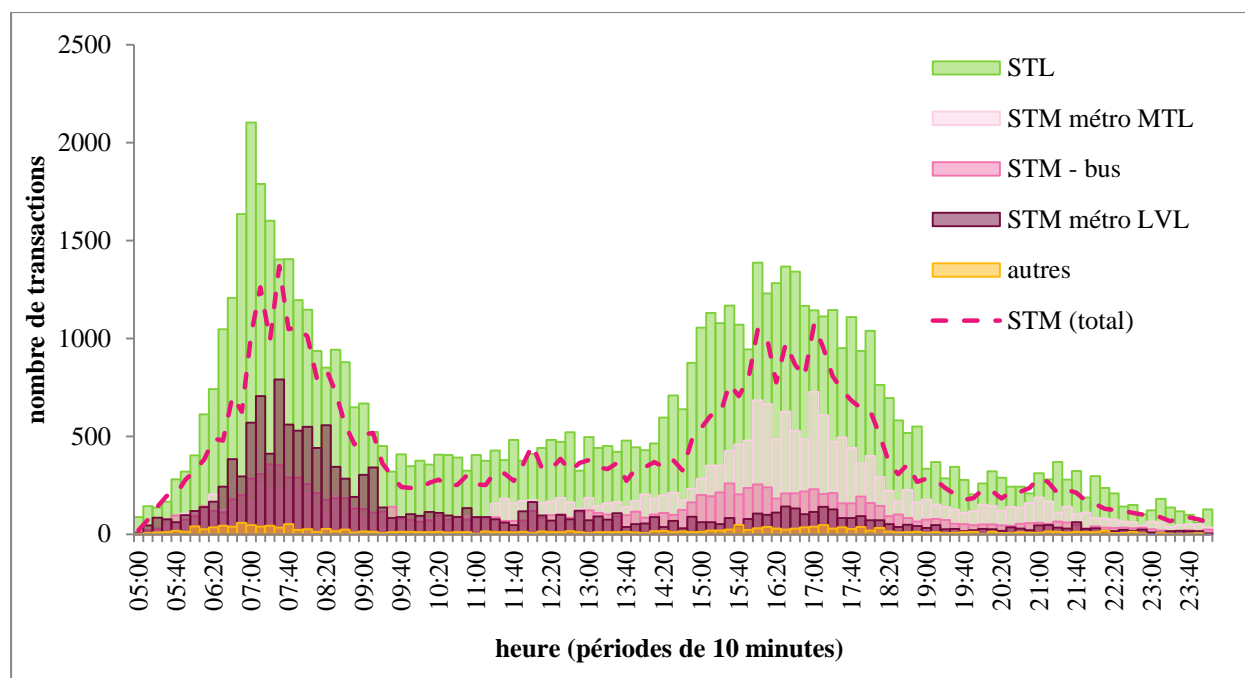


Figure 4-6: Distribution temporelle des transactions selon le réseau emprunté (périodes de 10 minutes)

En tout, 13 173 correspondances directes d'un autobus de la STL desservant une ligne régulière vers le réseau de métro sont recensées. Elles sont exposées à la Figure 4-7 et au Tableau 4-4 en fonction de la station où a lieu le changement de réseau. Les stations prépondérantes sont évidemment celles par lesquelles passent des lignes de la STL. Parmi les autres, on note les stations Parc, Bonaventure et Vendôme, trois stations avoisinant des gares de train de banlieue. Cela pourrait signifier que des correspondances ont été enregistrées d'un véhicule au métro, mais qu'un segment sur le réseau de train ait été effectué entre-temps. Ces portions de déplacements sont absentes de la base de données puisqu'aucune validation du titre n'est requise sur le quai pour les usagers en possession d'un titre intégré de type TRAM.

Le Tableau 4-3 présente les caractéristiques de deux transactions composant une correspondance du réseau de la STL vers le réseau de métro. La transaction à un tourniquet (ou aux vantaux) d'une station de métro doit être de type d'opération 3, et précédée d'une transaction faite sur le réseau régulier de la STL (code AOT 36).

Tableau 4-3: Attributs d'une transaction composant une correspondance de la STL vers le métro

	type de validation	code AOT	type d'équipement	ligne
transaction A		36 (STL)	BP (boîte de perception)	∈ [lignes STL]
transaction B	3	32 (STM)	TE ou PV (tourniquets ou vantaux)	

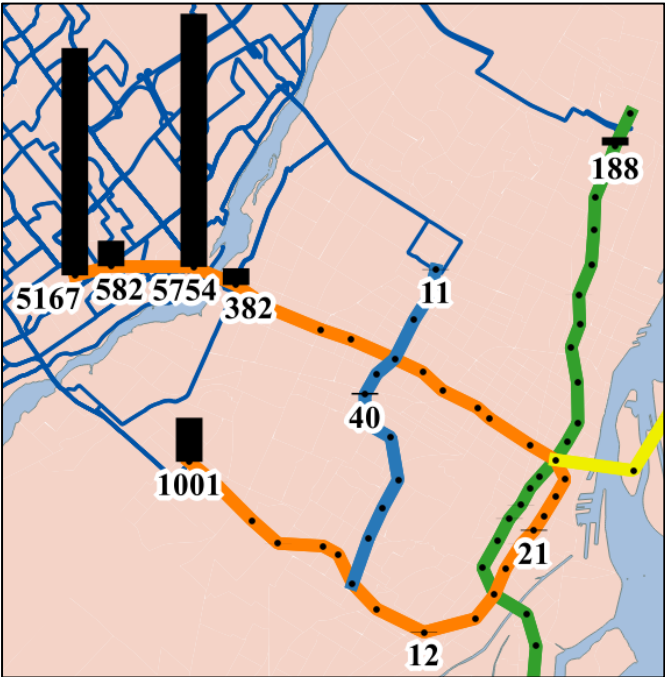


Figure 4-7: Correspondances de la STL vers le métro

Tableau 4-4: Correspondances de la STL vers le métro

Station	Correspondances
Cartier	5 754
Montmorency	5 167
Côte-Vertu	1 001
De la Concorde	582
Henri-Bourassa	382
Radisson	188
Parc	40
Bonaventure	21
Vendôme	12
Saint-Michel	11
Autres	15
Total	13 173

Note : Seules les stations avec plus de 10 correspondances sont montrées ici.

4.2.2 Enrichissement

Cet ensemble de données peut être enrichi pour corriger certaines situations ou pour faciliter des traitements ultérieurs.

4.2.2.1 Type de transaction

Le type de transaction détecté par la boîte de perception peut prendre des valeurs qui semblent être en incohérence par rapport à la définition d'un **déplacement** tel qu'utilisé par les planificateurs, soit un mouvement dans l'espace et dans le temps exécuté entre une origine et une destination. En effet, si un changement de titre est constaté par le système, une transaction de type 1 indiquant le début d'un nouveau déplacement est automatiquement enregistrée alors qu'il

est possible, comme mentionné un peu plus haut, qu'il s'agisse d'une correspondance sur un autre réseau de transport et que l'utilisateur ne possède pas de carte TRAM. La résolution de cette problématique se corrige en modifiant les conditions déterminant si une transaction en est une de correspondance ou non. Ainsi, il sera considéré qu'une transaction sur le métro fait par un même support ayant aussi été composté sur le réseau de la STL moins d'une heure auparavant est une correspondance (type 3).

4.2.2.2 Correction des heures de transaction aux stations de métro

L'étude minutieuse des chaînes de transactions issues de l'ensemble de données de cartes à puce mène à l'identification de certaines situations incongrues lorsqu'une correspondance est réalisée à certaines stations de métro. Les transactions de certains usagers ont effectivement été enregistrées comme des correspondances (type de validation = 3) à une station de métro suite à un autre segment de déplacement effectué dans un autobus. Cependant, l'heure de la validation enregistrée à la station de métro précède l'heure de validation dans la boîte de perception du véhicule. À moins d'admettre des comportements relevant de la mécanique quantique, ce voyage dans le temps est hautement improbable. Une fouille approfondie des données révèle que ces situations problématiques se reproduisent systématiquement aux mêmes tourniquets d'une station, laissant planer l'hypothèse d'une défectuosité de ceux-ci. Une analyse de l'ensemble des transactions réalisées à ces tourniquets montre que les transactions sont arrondies au quart d'heure.

Dans le but d'assurer la cohérence du système, la correction de ces cas passera par l'utilisation du concept de grappes de passagers. En effet, en général, l'utilisateur correspondant d'un véhicule à une station de métro en particulier n'est pas seul à effectuer ce mouvement. Ainsi, le temps de validation au tourniquet défectueux sera rectifié pour coïncider avec la médiane des temps de transactions des autres usagers composant la grappe. La médiane est préférée à la moyenne pour éviter de tenir compte des extrêmes, par exemple lorsqu'une personne effectue une activité intermédiaire avant de franchir le tourniquet de la station.

Parmi l'ensemble de données, deux systèmes de validation nécessitent une intervention; un tourniquet de la station Henri-Bourassa ainsi qu'un de la station Saint-Michel, située à Montréal à l'extrémité est de la ligne bleue, où à chacun d'eux sont recensées 4 correspondances depuis la STL.

Tableau 4-5: Stations nécessitant des corrections aux heures de validation

Station	ligne	Nombre de correspondances depuis la STL	
		tourniquet défectueux	total
Henri-Bourassa		4	342
Saint-Michel		4	11

4.3 Dérivation des origines et destinations

Comme discuté au Chapitre 2, la richesse des données AFC présente un nouveau potentiel quant au développement d'une demande pour un système de transport en commun. Cette section vise donc à établir, à partir des données de perception par CAP, une demande de transport touchant le réseau de transport de la STL, pouvant servir dans un contexte de microsimulation.

Une demande complètement désagrégée définie au niveau de l'individu sera extraite à partir des validations de titres de transport. Outre la dimension temporelle des origines connue grâce à la première validation d'un déplacement, seul le véhicule emprunté et sa ligne parcourue constituent les informations connues. L'objectif est de parvenir à déterminer spatialement l'origine et la destination de chaque déplacement. La méthode repose en grande partie sur l'identification des voyages planifiés parcourus par les différents véhicules.

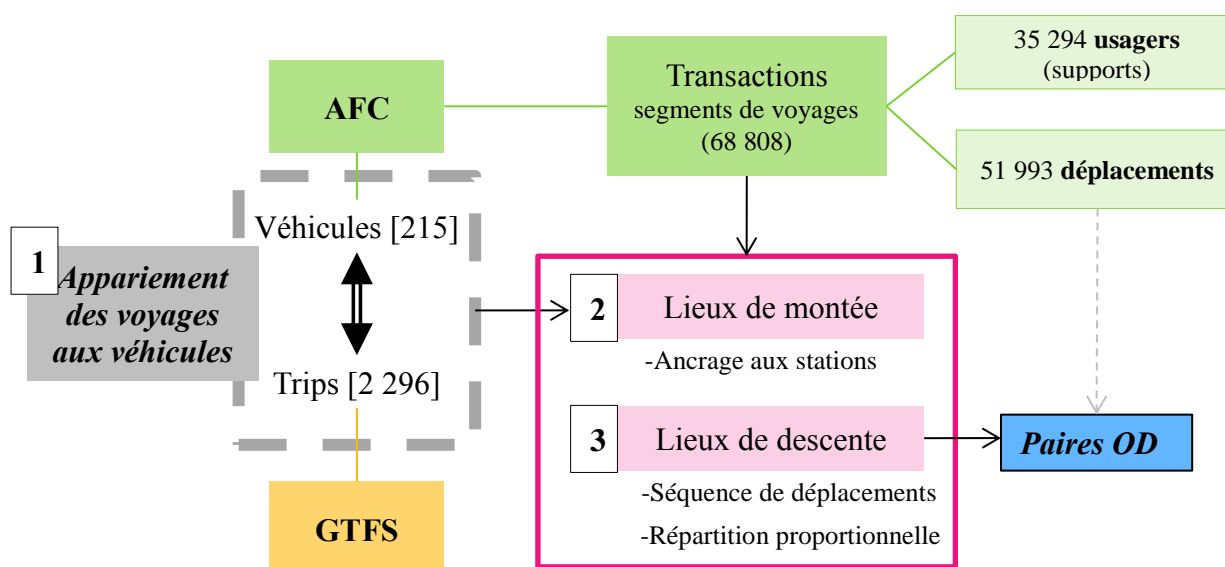


Figure 4-8: Étapes menant à l'estimation des origines et destinations

4.3.1 Appariement des voyages aux véhicules

À prime abord, aucune paire de coordonnées indiquant le lieu précis où le compostage d'un titre s'est produit n'est enregistrée dans la base de données. La seule information spatiale à la disposition de tous se trouve dans l'horaire planifié, à condition bien évidemment que le service rendu y corresponde. En s'appuyant sur cette hypothèse, si sont déterminés lesquels des voyages planifiés sont réalisés par chacun des véhicules, il sera loisible d'approximer le lieu (ou l'arrêt) de montée en comparant les temps de passage planifiés aux moments de validations des titres de transport dans la boîte de perception de l'autobus.

Il s'agit donc d'établir une relation entre les validations tirées d'un système de perception AFC et les données des horaires planifiés, exprimées dans le cas présent sous le format GTFS, en appariant les voyages prévus (*trip_id*) aux véhicules pour que les transactions puissent être associées à un voyage spécifique, et non simplement à un véhicule et à une ligne.

Comme le montre la Figure 4-9, grâce à la série de transactions propre à un véhicule ordonnée temporellement, chaque transaction étant marquée par un temps de validation et une ligne, il est possible de caractériser le parcours journalier d'un véhicule par la séquence de lignes empruntées. Cette division temporelle en segments définis par un numéro de ligne servira à l'association des véhicules aux différents voyages planifiés, bien que le point de départ et la fondation de ce rapprochement passent par l'ancrage des véhicules aux stations de métro.

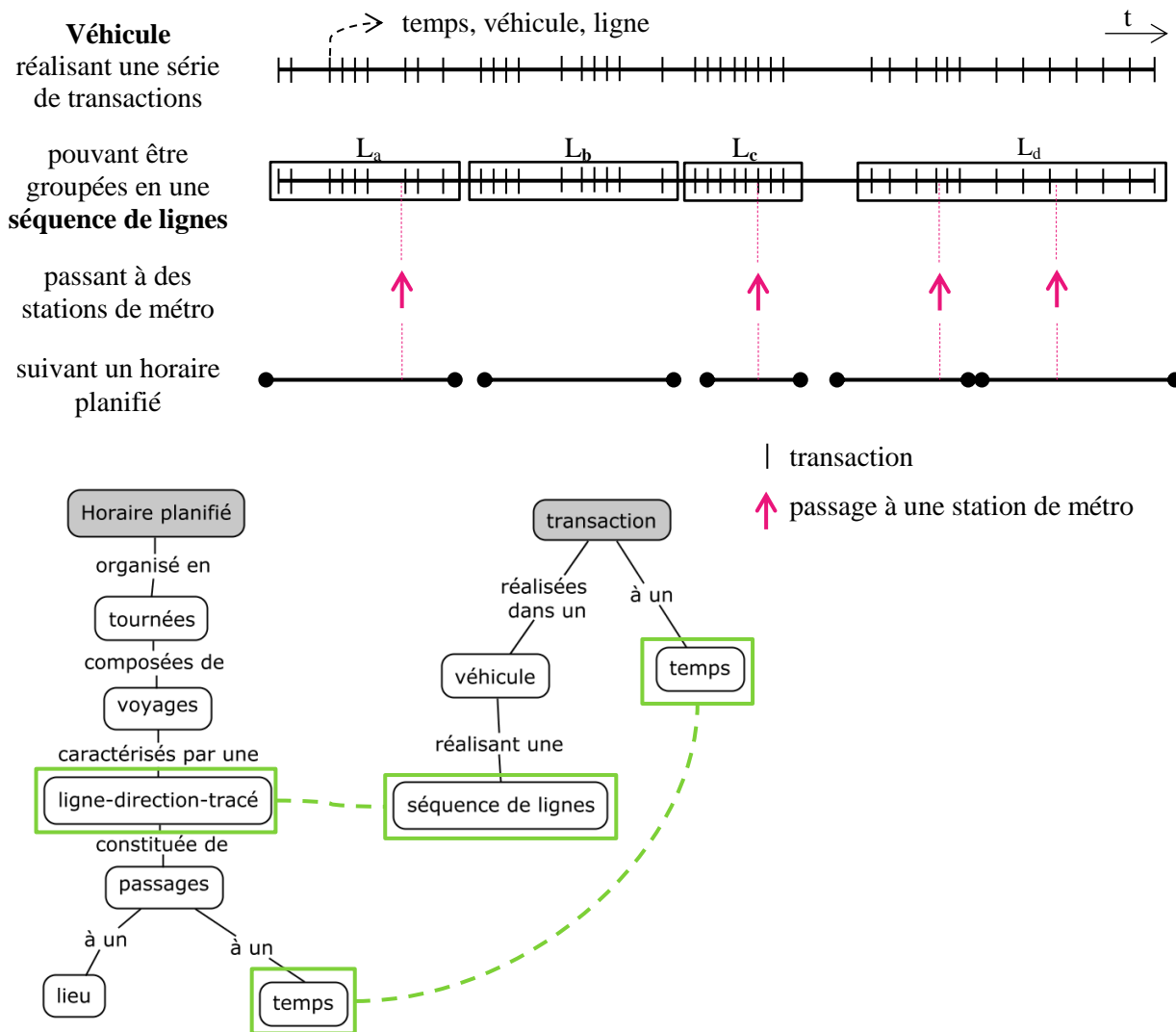


Figure 4-9: Relation entre l'horaire planifié et les validations issues d'un système AFC

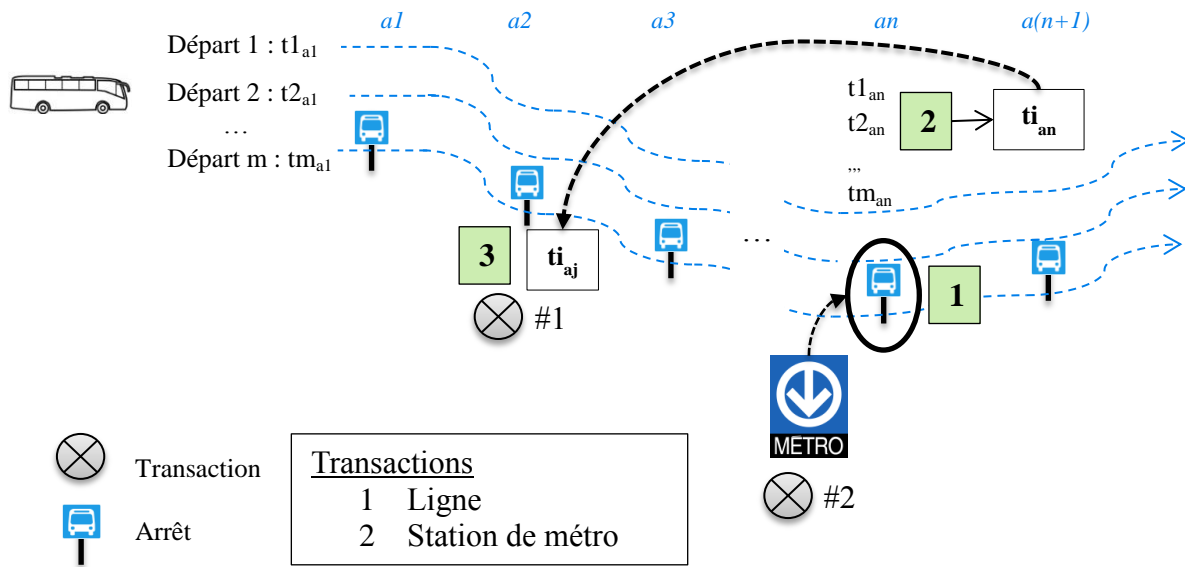
4.3.1.1 Ancrage aux stations de métro

Un des avantages des systèmes de cartes à puce est le pouvoir de suivre une grande proportion des individus, grâce à l'identifiant unique de leur carte, en observant leurs correspondances et leur série de déplacements. L'analyse des chaînes de déplacement des usagers devient un outil riche enrichissant la base de données initiale des transactions. La détermination du lieu d'une des transactions de la chaîne facilite en effet l'identification du lieu de descente précédent, d'où la pertinence de l'exploitation approfondie des correspondances.

Contrairement aux montées dans les autobus où la localisation spatiale des transactions est a priori inconnue avec les simples informations recueillies lors du processus de validation, une

transaction à une station de métro fournit une assurance quant à la position spatiale de l'utilisateur à un moment spécifique. Ces transactions de correspondance d'un réseau d'autobus vers un réseau de métro génèrent donc un ancrage spatio-temporel du véhicule. Effectivement, la connaissance de l'heure de la transaction au tourniquet d'une station permet d'estimer le moment de descente du véhicule emprunté précédemment, et conséquemment la localisation géographique dudit véhicule, soit à proximité de la station de métro. C'est donc pour cette raison que cette stratégie d'analyse constitue la base du processus d'identification des voyages planifiés réalisés par les véhicules.

Une comparaison des temps de transaction aux tourniquets avec les données des horaires planifiés du service de transport de surface, exprimées sous le format GTFS, permet ainsi d'identifier le voyage le plus plausible réalisé par le véhicule dans lequel se trouvait l'utilisateur procédant à la correspondance. En effet, sous l'hypothèse que l'horaire planifié est respecté, le voyage associé au véhicule est celui, parmi ceux étant définis par le même numéro de ligne que celui enregistré lors de la transaction dans l'autobus, dont le temps de passage s'approche le plus du moment où les correspondances sont réalisées.



1	Identification de l'arrêt le plus près (tel qu'inclus dans la séquence d'arrêt de la ligne)
2	Identification du départ GTFS
3	Détermination du lieu de montée

$$Départ = i \text{ tel que } \min\{(t_{transaction2} - ti_{an}) : i \in D\}$$

où D est l'ensemble des départs \in Ligne-Direction (transaction 2)

$$Arrêt = j \text{ tel que } \min\{|t_{transaction1} - ti_{aj}| : j \in A\}$$

où A est l'ensemble des arrêts $\in D$

Figure 4-10: Schématisation de la procédure d'ancrage à une station de métro

4.3.1.2 Analyse des tournées

Suite à l'appariement réussi de certains voyages à des véhicules spécifiques à partir d'ancrages au réseau de métro, il est possible d'utiliser le concept de tournées pour procéder à des associations supplémentaires. En effet, si des voyages d'une même tournée ont auparavant été associés à un même véhicule, on peut supposer que les autres voyages de cette tournée ont aussi été effectués par ce véhicule, particulièrement si son horaire planifié se retrouve entre deux voyages déjà identifiés. Si cette hypothèse est validée par les numéros de ligne rattachés aux transactions de CAP enregistrées sur ce véhicule durant la période correspondant à la plage

temporelle planifiée du voyage, ce voyage sera couplé au véhicule en question (voir la Figure 4-11).

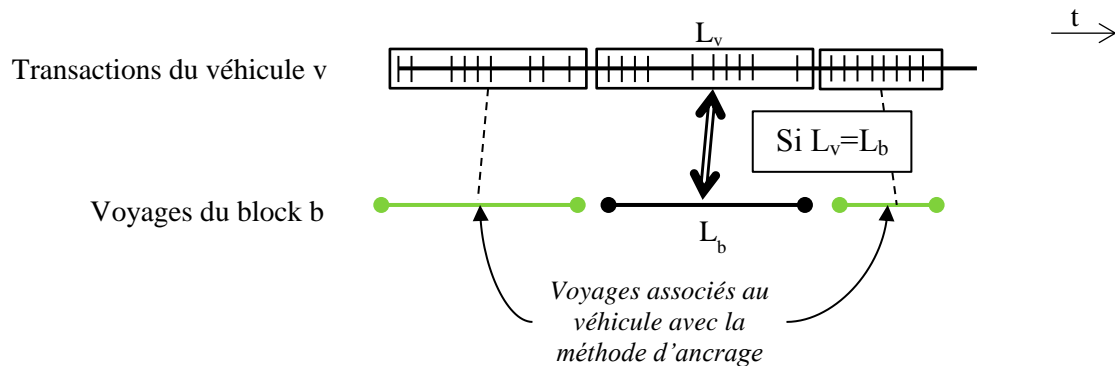


Figure 4-11: Utilisation du concept de tournée pour l'association d'un voyage à un véhicule

4.3.1.3 Autres voyages

L'assignation faite avec l'utilisation des blocks diminue le nombre de voyages à associer aux véhicules, tout en limitant les possibilités de mise en relation, certains véhicules étant dorénavant consacrés pour certaines périodes temporelles à la réalisation d'autres voyages. Les voyages non appareillés à cette étape sont associés au véhicule ayant parcouru une ligne identique à celle du voyage lors d'une même plage temporelle. Lors de conflits d'appariement, c'est-à-dire lorsque plus d'un voyage planifié avec des périodes se chevauchant sont associés à un même véhicule, un seul voyage sera retenu pour ce véhicule. Il s'agira de celui dont la moyenne de la plus petite différence temporelle entre chaque passage-arrêt de ce voyage et une transaction du véhicule est minimale.

$$\Delta_{moyen}(\text{voyage} \leftrightarrow \text{vehicule}) = \frac{\sum_{i=1}^n \min\{(t_{transaction\ x} - t_{passage\ i}) : x \in T\}}{n}$$

où n est le nombre de passages-arrêts du voyage

et T est l'ensemble des transactions effectuées dans le véhicule

La visualisation des transactions effectuées sur la boîte de perception d'un véhicule mise en opposition avec les voyages retenus, par exemple avec un outil comme un SIG, permet de valider la cohérence des assignations. Elle permet en plus de compléter l'assignation des voyages aux véhicules. Au final, moins de 2% des voyages n'ont pu être assignés à un véhicule en

particulier. Plusieurs logiques pourraient être considérées en tant qu'explications. Outre les possibles erreurs d'assignation, il est probable qu'aucune transaction n'ait été compositée lors de ce voyage, ou simplement que le voyage n'ait pas été réalisé, en partie ou au complet. On comprend que l'utilisation de données GPS, dont est dotée la flotte d'autobus de la STL, pourrait compléter ou valider la présente analyse.

Tableau 4-6: Voyages assignés aux véhicules selon la méthode utilisée

Méthode	Nombre de voyages assignés	% des voyages planifiés (2 296 trip_id au total)
Ancrage aux stations	957	41.7%
Suivi des tournées	1 030	44.8%
Δ moyen	256	11.1%
Ajustement manuel ou visuel	22	1,0%
Total	2 265	98.6%

4.3.2 Identification des origines

La méthode d'ancrage à partir des correspondances, présentée plus haut pour l'identification du voyage réalisé par un véhicule, peut éventuellement mener à la détermination du lieu de montée dans un autobus d'un passager réalisant une correspondance du véhicule à une station de métro. L'information acquise relative au voyage planifié réalisé par le véhicule a pourtant une portée beaucoup plus étendue. Le voyage identifié ayant un début et une fin sur l'échelle temporelle, il est possible d'assumer que toutes les transactions réalisées sur la même boîte de perception dans cet intervalle sont aussi associées au même voyage. Les usagers voyageant dans un même autobus, pouvant aussi être nommés comme une « grappe » de passagers, partagent donc des caractéristiques communes. Les données de transactions d'usagers faisant partie de la même grappe qu'un usager dont les informations concernant le voyage ont été déterminées peuvent donc être enrichies par le transfert des valeurs de certains attributs.

Ainsi, à partir de la connaissance établie de la séquence de voyages effectués par un véhicule, il est possible d'estimer le lieu le plus probable où la transaction a été enregistrée. Toujours suivant l'hypothèse sous laquelle l'horaire planifié est respecté, l'arrêt de montée est identifié par celui dont l'heure du passage-arrêt planifié, parmi ceux effectués par le véhicule, est le plus près temporellement de l'heure de la transaction. Ces lieux de montée doivent toutefois

être en cohérence avec l’ancrage des véhicules aux stations réalisé lors du jumelage des voyages et des véhicules. En effet, les transactions, donc les lieux de montée, associées à un voyage et enregistrées avant un point d’ancrage à une station doivent être assignées à un arrêt précédant la station dans l’ordre de la séquence d’arrêts du voyage.

De plus, parmi l’ensemble des transactions réalisées dans un même véhicule, plusieurs sont des correspondances effectuées depuis le réseau de métro. La station de métro de sortie, non recensée par le système de perception, est supposée être celle la plus près de l’arrêt de montée. Il est donc possible de fixer à nouveau la position du véhicule dans l’espace et dans le temps aux stations de métro, comme illustré à la Figure 4-12. Le véhicule est reconnu être localisé à une station donnée au temps médian des correspondances issues de cette station. Les stations de métro situées au dernier arrêt d’une ligne sont d’ailleurs à exclure comme lieu de montée, supposant qu’aucun passager ne peut être transporté en dehors du service commercial et que l’autobus est complètement vide à la fin d’un voyage.

Ce deuxième ancrage spatio-temporel permet d’aborder l’aspect de la ponctualité par la comparaison avec l’horaire planifié. Sans admettre la capacité à corriger l’ensemble des problèmes de ponctualité, l’établissement d’une position à un moment spécifique avise toutefois qu’une autre transaction faite dans le même véhicule à un moment subséquent doit avoir été effectuée à la station ou à un arrêt suivant celle-ci, bien que peut-être contraire aux informations indiquées par l’horaire planifié.

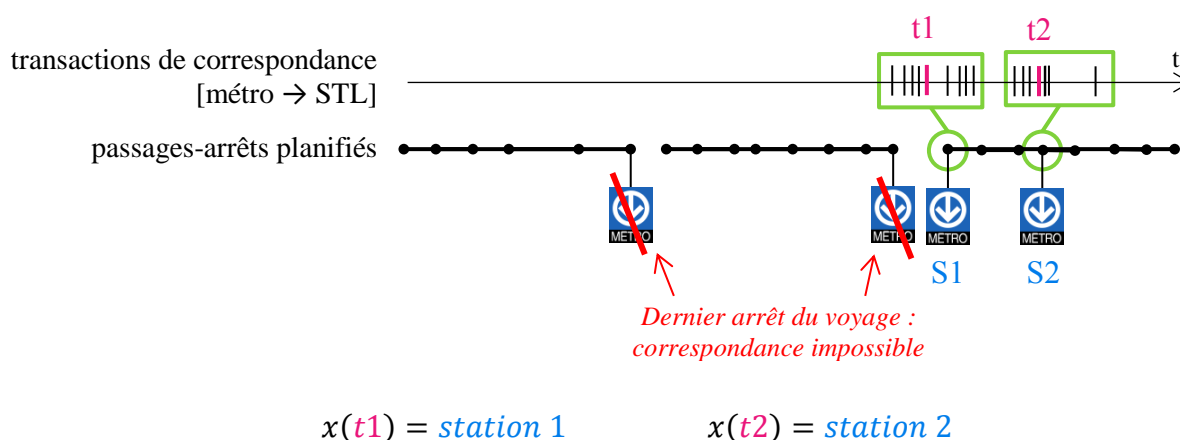


Figure 4-12: Fixation spatio-temporelle d'un véhicule

Un critère de distance temporelle entre l'heure de transaction et l'heure d'un passage planifié doit être appliqué pour éviter des incongruités. En posant ce critère à 10 minutes pour laisser les usagers monter à bord d'un autobus en battement par exemple, 68 553 des 68 808 transactions (99,6%) ont pu être associées à un voyage effectué par un véhicule. Parmi les transactions dont aucun lieu de montée n'a pu être estimé, 58 ont été réalisées sur des autobus après la fin de l'offre de service commercial ($t > 28:00:00$), éliminant la vraisemblance d'un réel déplacement; il pourrait peut-être s'agir d'opérations de maintenance une fois le véhicule de retour au garage.

4.3.3 Identification des destinations

Puisqu'aucune validation n'est enregistrée à la sortie du véhicule, le lieu de descente ne peut être supposé comme dans le cas des origines. La connaissance du véhicule et des voyages réalisés par celui-ci édifie néanmoins une certaine fondation à partir de laquelle une méthode de dérivation des destinations est élaborée. Cette méthode est divisée en deux principales étapes, soient l'estimation des lieux de descentes à partir de la séquence de déplacements, fortement inspirée de Trépanier et al. (2007), puis la distribution proportionnelle des autres points de descente n'ayant pu être déterminés.

4.3.3.1 Séquence de déplacements

La première étape vise à exploiter la séquence de déplacements effectués par les usagers du réseau. Cette technique ne peut évidemment qu'être appliquée aux usagers dont le titre de transport est enregistré sur un support pouvant être suivi. En règle générale, si le seul mode de transport d'un individu est le transport en commun, l'origine d'un de ses déplacements doit correspondre à la destination du déplacement précédent. Ainsi, l'arrêt de descente sera défini comme le plus près de l'origine suivante, autrement dit l'arrêt de montée suivant, dans la mesure où il réaliste de marcher entre ces deux lieux dans le contexte d'un déplacement en transport en commun. Le même principe peut d'ailleurs être appliqué à la séquence de segments d'un déplacement, c'est-à-dire lorsque des correspondances ont lieu.

Si la correspondance est effectuée vers une station de métro, le lieu de descente de l'autobus emprunté précédemment sera sans contredit l'arrêt du passage, parmi les passages-arrêts du voyage, se situant le plus près de la station de métro en question. Dans le cas d'une

correspondance vers un autre autobus du réseau de la STL, le lieu de descente sera considéré comme étant l'arrêt le plus rapproché géographiquement de l'arrêt de montée à bord du véhicule suivant.

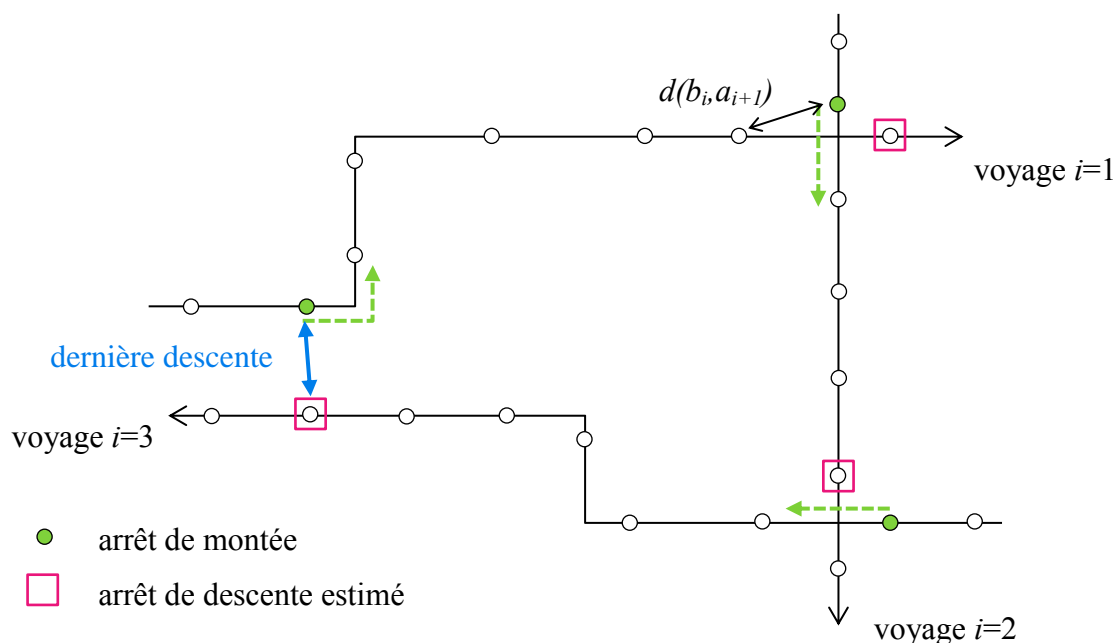
Il s'agit donc d'estimer, pour un usager u montant à l'arrêt a du voyage v_i emprunté, l'arrêt de descente b (i représentant le numéro de séquence du voyage parmi ceux empruntés par l'usager). L'arrêt b doit être inclus parmi l'ensemble des arrêts suivant l'arrêt a dans la séquence des passages du voyage v_i . Sa sélection est basée sur le critère de distance euclidienne avec l'arrêt de montée du voyage suivant $d(b_i, a_{i+1})$ qui doit être minimale. Ainsi, pour chaque usager,

$$\text{arrêt de descente} = b_i \quad \text{tel que} \quad \min\{d(z_i, a_{i+1}) : z \in S\}$$

où S est l'ensemble des arrêts $s \in v_i$ tel que $\text{stop_sequence}(s) > \text{stop_sequence}(a_i)$

Dans un même ordre de pensée, il est permis d'imaginer que le dernier déplacement pourrait se destiner au premier lieu d'origine, prenant en considération qu'une personne part de son domicile et y retourne en fin de journée. De ce fait, pour le dernier segment de voyage emprunté, l'arrêt de descente b_i est plutôt celui le plus près de a_1 , et non a_{i+1} puisqu'il est inexistant. Cette méthode d'estimation du lieu de descente, schématisée à la Figure 4-13, pourrait être améliorée et s'avèrerait sans doute plus juste et avec un ensemble de données rassemblant les transactions d'une période étendue sur plus d'une journée.

Évidemment la méthode décrite n'est valable que si le transport en commun est le seul mode de transport utilisé par l'usager au cours de la journée étudiée. De plus, pour le dernier arrêt de descente, elle n'est admissible que dans le cas où la première origine serait la même que la dernière destination. Ainsi, un seuil de distance maximale entre les arrêts b_i et a_{i+1} pour pouvoir sélectionner b_i . Cette limite est fixée à une distance de 1.5 km, ce qui représente une durée de marche un peu moins de 20 minutes à une vitesse de 5 km/h.



(figure reprise de Trépanier et al., 2007)

Figure 4-13: Estimation des lieux de descente à partir de la séquence de voyages empruntés

Tableau 4-7 : Lieux de descentes estimés avec la séquence de déplacement

Type	Nombre de descentes	Proportion*
correspondances	21 781	31.8%
vers le métro	13 012	19.0%
vers un autobus de la STL	8 769	12.8%
déplacement suivant	13 840	20.2%
premier déplacement	18 072	26.4%
Total	53 693	78.3%

*sur le total des transactions dont le lieu de montée a pu être estimé (68 553)

4.3.3.2 Répartition proportionnelle

Pour le reste des déplacements dont la destination n'a pu être détectée, s'agissant notamment du cas des déplacements effectués avec un support à usage unique, une dernière étape de répartition des destinations sera mise en application. Comme une seule journée est disponible et qu'un lieu de descente n'a pu être identifié à partir de la séquence de déplacements, les destinations seront réparties sur les autres arrêts de la ligne en fonction de leur utilisation. Les lieux de descente de ces déplacements, qui sont au nombre de 14 860 (21.7%), seront localisés, pour chaque ligne-direction, de manière proportionnelle aux montées des différents arrêts de la

direction opposée. Le profil des montants de la direction inverse est utilisé pour tenir compte de la symétrie spatiale et temporelle des deux directions d'une ligne. Cette hypothèse de symétrie avec la direction opposée ne s'applique que si l'ensemble des montants d'une journée complète est utilisé, puisque le nombre de déplacements dans une direction varie en fonction du temps.

Le nombre de montants de chaque arrêt de la direction opposée est associé à l'arrêt de la direction étudiée situé le plus près géographiquement, c'est-à-dire celui pour laquelle la distance euclidienne est minimale. La distribution obtenue exprime un profil de descentes souhaité, tel qu'illustré à la Figure 4-14. Les lieux de descentes jusqu'alors irrésolus sont répartis de manière proportionnelle au profil établi.

L'algorithme utilisé pour distribuer les arrêts de descente débute par l'assignation des montants du dernier arrêt (celui dont le numéro de séquence est le plus élevé) vers l'arrêt de descente disponible le plus près de la fin de la ligne-direction. Si la « capacité » de descente est atteinte, l'arrêt le précédent est sélectionné. Chaque arrêt comportant des montants est ainsi traité, en ordre décroissant de numéro de séquence, jusqu'à ce qu'une destination ait été affectée à tous les montants. Il est à noter que pour tout montant, l'arrêt de descente doit être subséquent à l'arrêt de montée. Si la « capacité » de descendants est atteinte pour l'ensemble de ces arrêts, l'arrêt de descente sélectionné correspondra au lieu le plus achalandé, c'est-à-dire celui avec le plus grand nombre de descendants. L'Annexe C présente un diagramme de la procédure employée pour affecter à chaque montant un lieu de descente alors que la Figure 4-14 illustre un exemple de cette répartition.

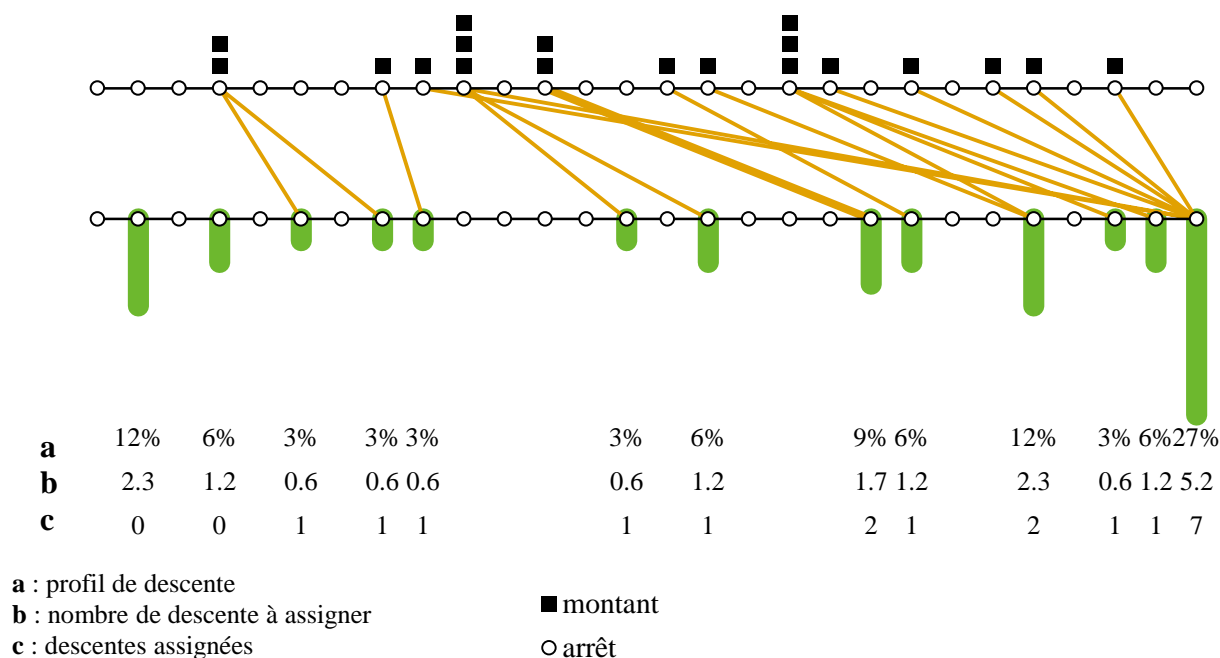


Figure 4-14: Exemple de répartition proportionnelle des arrêts de descente

4.4 Portrait

Suite à l'estimation des lieux de montée et de descente, il est loisible de caractériser l'utilisation du réseau et les déplacements des passagers (Tableau 4-8). Les taux d'occupation spatial et temporel du service commercial, calculés au Tableau 4-9, tracent un portrait global de l'utilisation du service. Bien que les données issues d'un système de perception ne contiennent pas autant d'information sur les usagers du réseau que les celles recueillies lors d'une enquête OD, les titres utilisés permettent tout de même de catégoriser la demande. Certains indicateurs globaux peuvent par exemple être classés en fonction du tarif payé pour le déplacement.

Tableau 4-8: Nombre de déplacements et de correspondances

Nombre de déplacements	59 113
Nombre de segments de déplacements sur le réseau STL	68 553
Nombre de segments moyen STL par déplacement	1.16

Tableau 4-9: Passagers-km, passagers-heures et taux d'occupation

	transactions (segments de ligne)	passagers-km	passagers-heures
tarif ordinaire	30 236	194 563	8 304
tarif réduit	33 019	239 968	10 490
autre	5 298	38 944	1 654
total	68 553	473 475	20 449

Taux d'occupation spatial

$$\frac{473\,475 \text{ pass} \cdot \text{km}}{37\,337 \text{ veh} \cdot \text{km}} = 12.7 \text{ pass/veh}$$

Taux d'occupation temporel

$$\frac{20\,449 \text{ pass} \cdot \text{hre}}{1\,518 \text{ veh} \cdot \text{hre}} = 13.5 \text{ pass/veh}$$

Se restreindre à une telle analyse générale ne rendrait cependant pas justice à la richesse qu'offrent les résultats du traitement des données de CAP. L'analyse détaillée d'une ligne, comme présentée en exemple au Tableau 4-10 et à la Figure 4-15, permet d'apprécier l'achalandage aux différents arrêts de la ligne, tant en termes du nombre de montants que du nombre de descendants. Les données individuelles de chaque voyageur permettent de choisir le niveau d'agrégation de la période temporelle, l'exemple montrant ici les données pour une journée de service entière ainsi que pour la période de pointe matinale (5h à 9h). L'exemple présenté illustre la ligne 42, une des lignes de la STL dont le service est le plus fréquent et qui, à l'instar de la plupart des lignes, passe par une des trois stations de métro situées à Laval. La répartition spatiale des montants et descendants est inégale dans les deux directions. En direction est, la plupart des montées se fait aux environs de la station Montmorency, alors qu'en sens inverse, la distribution est plus lissée parmi l'ensemble des arrêts. Les descentes de la direction ouest sont cependant très concentrées près de la station de métro, particulièrement en période de pointe AM, ainsi qu'au terminus, le Carrefour Laval, pour le reste de la journée. Cette visualisation confirme le rôle important du métro et son pouvoir d'attraction dans les déplacements effectués sur cette ligne. Le terminus le Carrefour, où des lieux de travail sont présents, mais aussi des lieux de magasinage, semble être un générateur important aligné avec la ligne 42.

Par ailleurs, la définition précise aux arrêts permet de segmenter l'analyse en plusieurs tronçons. Les sections sélectionnées sont ici définies par des infrastructures existantes, soient les

autoroutes 19 et 25. Cette segmentation témoigne de l'utilisation inégale la ligne, le segment le plus à l'Est (C) étant le moins utilisé.

En somme, on peut imaginer de tels types d'analyses conduisant à une redéfinition de la notion de l'utilisation de réseau, qui pourrait influencer les méthodes de planification visant une restructuration des lignes ou encore contribuer à la clarification de divers enjeux, notamment en ce qui concernerait le partage des recettes entre différentes agences de transport.

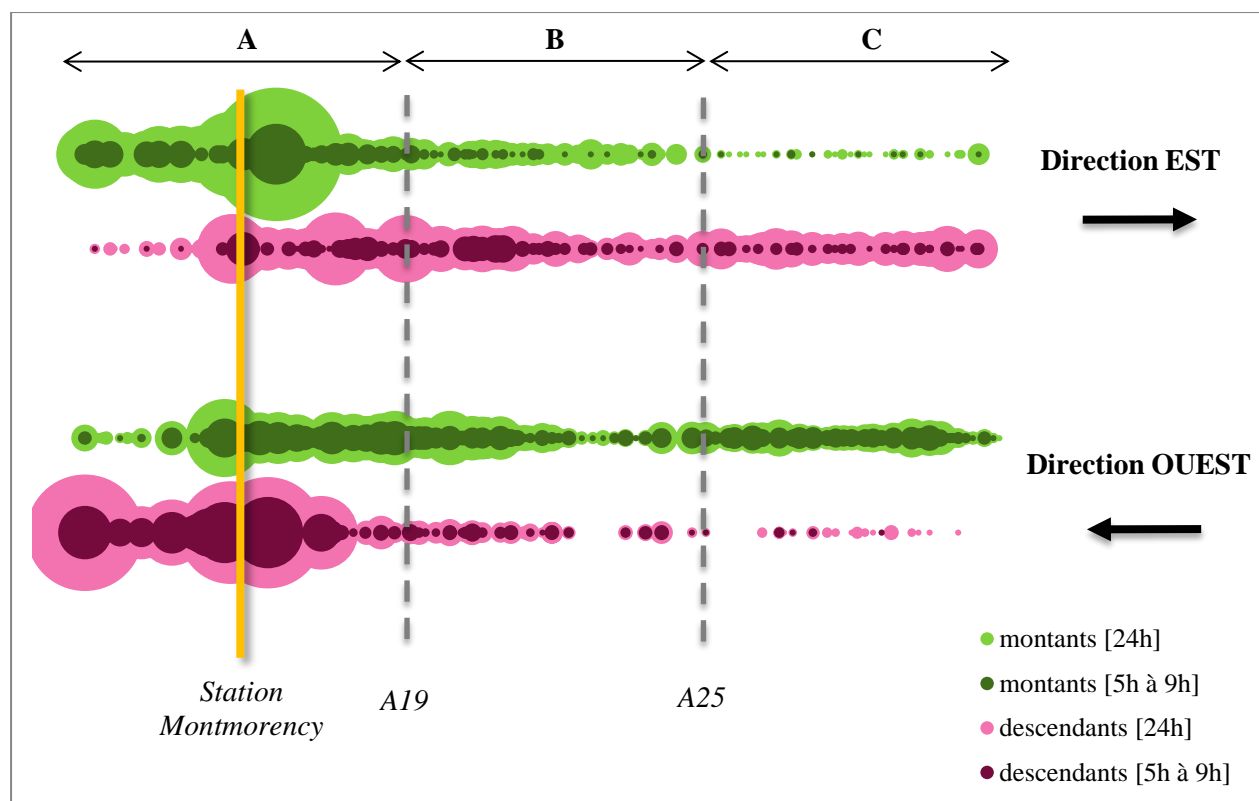


Figure 4-15: Montants et descendants sur la ligne 42, journée entière et période AM

Tableau 4-10: Caractérisation de la ligne 42, divisée en trois tronçons

	direction	période	tronçon	montants	descendants	pass-km	pass-hre	D _{moy}	D _{med}	D _{min}	D _{max}	t _{moy}	t _{med}	t _{min}	t _{max}
EST	5h à 9h		A	459	1427	1675.2	3.5	3.6	3.0	0.0	20.1	10.9	9.8	0.1	49.7
			B	85	991	210.9	0.3	2.5	0.2	0.1	11.7	5.4	1.0	0.5	22.1
			C	12	755	22.7	0.0	1.9	0.8	0.1	7.3	4.7	2.4	1.0	15.1
			Total	556	556	1909	3.8	3.4	2.6	0.0	20.1	10.0	7.8	0.1	49.7
	29h		A	2602	2894	14816.9	29.8	5.7	4.1	0.0	25.7	16.5	13.3	0.1	71.0
			B	503	234	2513.3	3.5	5.0	5.3	0.1	15.2	10.0	10.0	0.4	30.5
			C	68	45	124.4	0.2	1.8	0.8	0.1	7.4	4.2	2.0	0.2	15.2
			Total	3173	3173	17455	33.5	5.5	4.0	0.0	25.7	15.2	12.7	0.1	71.0
OUEST	5h à 9h		A	521	202	5161.3	9.3	10.9	11.6	0.1	24.7	27.4	27.1	0.4	65.2
			B	224	515	1136.9	2.4	5.6	4.9	0.1	15.9	17.6	15.7	0.4	49.0
			C	226	2159	576.0	1.3	2.7	2.4	0.1	8.8	8.9	7.9	0.3	30.8
			Total	971	971	6874	12.9	7.1	4.7	0.1	24.7	19.1	14.4	0.4	62.8
	29h		A	1011	2011	10992.8	19.3	9.9	8.3	0.1	24.7	25.7	15.1	0.4	62.8
			B	805	279	4506.1	9.8	5.1	4.4	0.1	15.9	8.0	13.0	0.5	43.8
			C	1060	586	2841.1	6.6	2.5	2.3	0.1	8.8	21.6	7.2	0.6	26.2
			Total	2876	2876	18340	35.7	6.4	4.3	0.1	24.7	17.9	13.6	0.3	65.2

D : distance parcourue en véhicule jusqu'à la descente, pour les montées se situant sur le tronçon indiqué

t : temps en véhicule de la montée à la descente, pour les montées se situant sur le tronçon indiqué

4.4.1 Profil de charge

La dérivation des arrêts de montée et de descente de chacun des usagers permet de connaître le nombre de passagers dans le véhicule et sa variabilité selon sa position dans le trajet qu'il parcourt. La visualisation du profil de charge est d'ailleurs souvent utilisée par les planificateurs pour obtenir une meilleure compréhension de l'utilisation d'une ligne. La Figure 4-16 illustre un profil de charge typique pour un voyage achalandé d'un réseau de transport de surface. 114 transactions sont enregistrées sur ce voyage, contribuant à 567 passagers-kilomètres, obtenus par le calcul de l'aire sous la courbe du profil de charge. Le point de charge maximale est de 62 passagers, rencontré suite au passage du véhicule à la station Montmorency où un grand nombre de passagers montent à bord.

Le caractère désagrégué des données de cartes à puce permet, en plus du profil typique pouvant être obtenu notamment avec de simples compteurs de passagers, d'illustrer dans la partie inférieure du graphique les paires O-D de chacun des usagers, c'est-à-dire leurs lieux respectifs de montée et de descente.

L'ajout d'une variable temporelle sur une troisième dimension permet de représenter les profils de charge d'une série de voyages consécutifs d'une même ligne-direction dans un même dessin. Ce type de visualisation (Chu & Chapleau, 2008) devient pour les planificateurs une ressource offrant l'opportunité d'apprécier les variations temporelles et spatiales de la demande au cours d'une journée. L'exemple développé à la Figure 4-17 présente quinze voyages successifs d'après-midi de la ligne 42 en direction est. Bien que l'achalandage diffère d'un départ à l'autre, les profils sont similaires, comportant tous une augmentation de leur charge suite au passage vis-à-vis la station de métro.

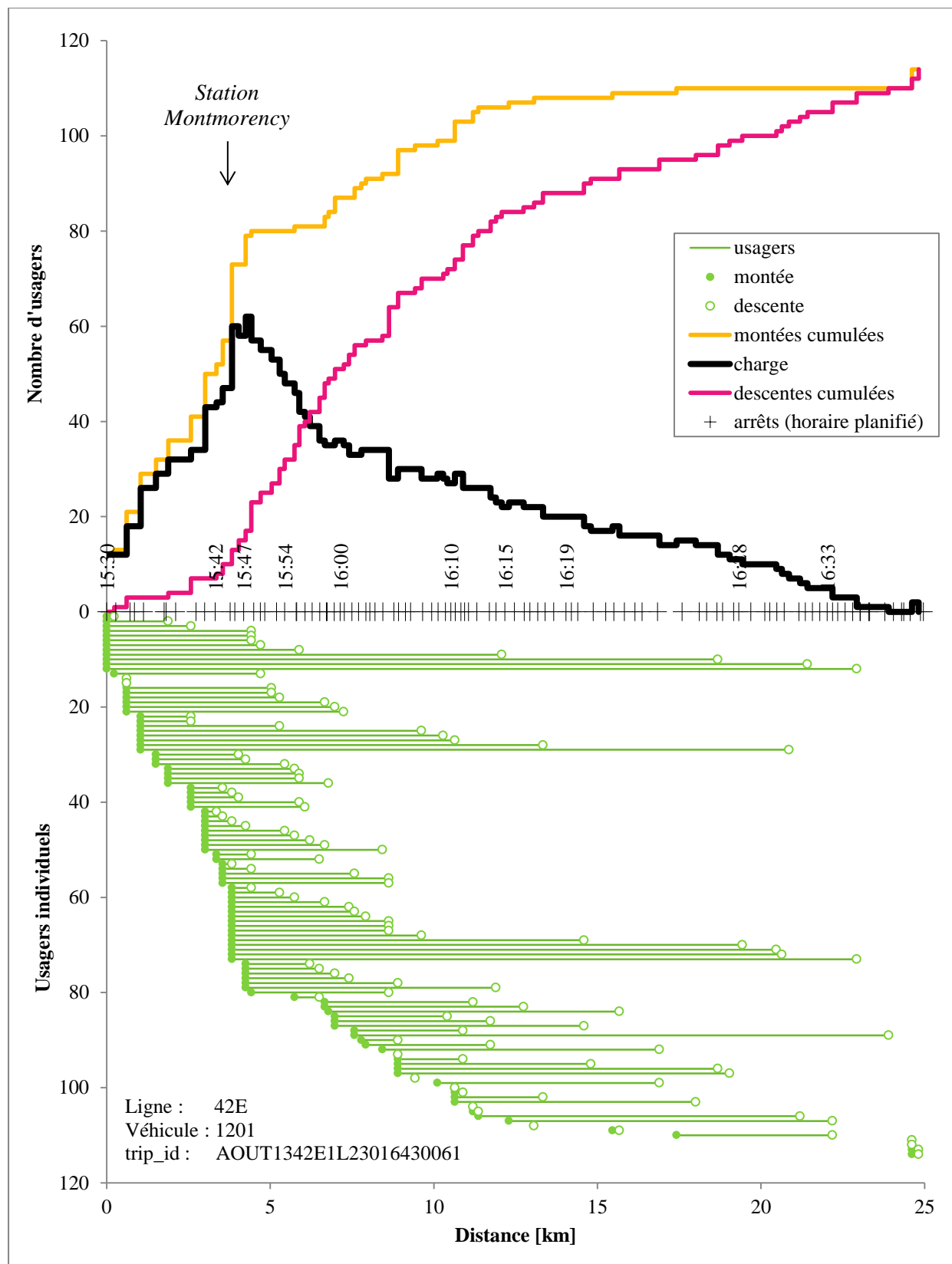
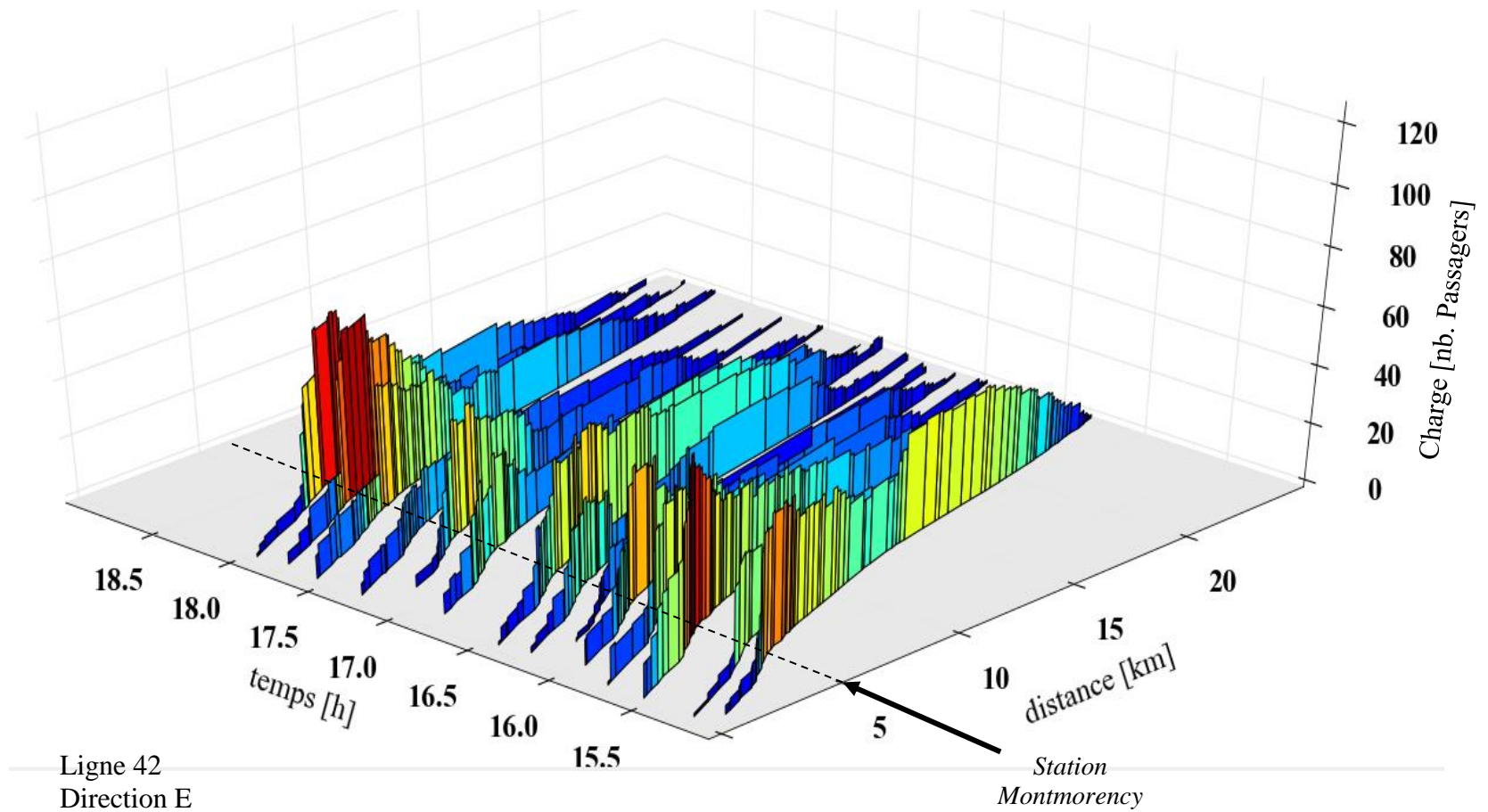


Figure 4-16: Profil de charge d'un voyage dérivé des transactions de cartes à puce



L'Annexe D présente une autre visualisation tridimensionnelle des profils de charge

Figure 4-17: Profils de charge de voyages consécutifs d'une même ligne en après-midi

CHAPITRE 5 MODÉLISATION AVEC TRANSIMS

L'intérêt des présentes expérimentations est porté sur un niveau de résolution mésoscopique. Bien que les instruments utilisés permettent des simulations à un niveau microscopique, l'objectif n'est pas, par exemple, d'examiner en détail les mouvements des véhicules aux intersections ou les changements de voies effectués. Cependant, des simulations d'ordre macroscopique sont à exclure puisqu'une demande, définie déplacement par déplacement, varie temporellement et qu'un suivi de chaque véhicule ainsi que de son état est désiré.

5.1 TRANSIMS

TRANSIMS (Transportation Analysis and Simulation System) est un ensemble d'outils, disponible sous la NASA Open Source Agreement Version 1.3, permettant la modélisation à grande échelle des réseaux de transport et la microsimulation des déplacements (Google Project Hosting, 2013). Financé par le Département de Transports des États-Unis (US Federal Highway Administration), TRANSIMS fut initialement développé par le Los Alamos National Laboratory (LANL) avant que le développement soit confié au TRACC (Transportation Research and Analysis Computing Centre) du Laboratoire national d'Argonne dans la région de Chicago. La modélisation de corridor de transport multimodaux afin d'étudier les émissions de gaz à effet de serre produits par les systèmes de transport constitue la principale justification de son développement et de son financement. TRANSIMS a aussi été employé dans la modélisation d'évacuation de grandes villes métropolitaines en cas d'éventuelles catastrophes.

TRANSIMS est une plateforme basée sur des agents (*agent-based*). Le système, qui utilise un calcul par automates cellulaires, simule seconde par seconde les mouvements d'individus réalisant leurs déplacements, ces derniers étant définis selon la notion d'activités (*activity-based*).

5.1.1 Organisation

Les fichiers nécessaires à une modélisation TRANSIMS sont organisés sous la notion de projet. Un dossier projet est organisé de manière systématique, comportant plusieurs répertoires dans lesquels se trouvent des types de fichier distincts : fichier de projet et procédures python

(runtime environment), inputs nécessaires à construction du réseau, fichiers de demande, fichiers de contrôle, fichiers de réseau, fichiers outputs de résultats de l'affectation et de la simulation. Les différents fichiers interagissent entre eux, comme montré à la Figure 5-1 où est schématisée l'organisation des éléments menant à de l'utilisation de TRANSIMS

Une interface utilisateur, TRANSIMS Studio, a été développée d'une part afin de faciliter l'organisation, la visualisation et la manipulation des fichiers impliqués (inputs, outputs, fichiers de contrôle, rapports d'exécution, etc.). Comme illustré à la Figure 5-2, il permet d'exécuter des procédures Python et donc l'appel de modules TRANSIMS⁶ (Ley, 2010).

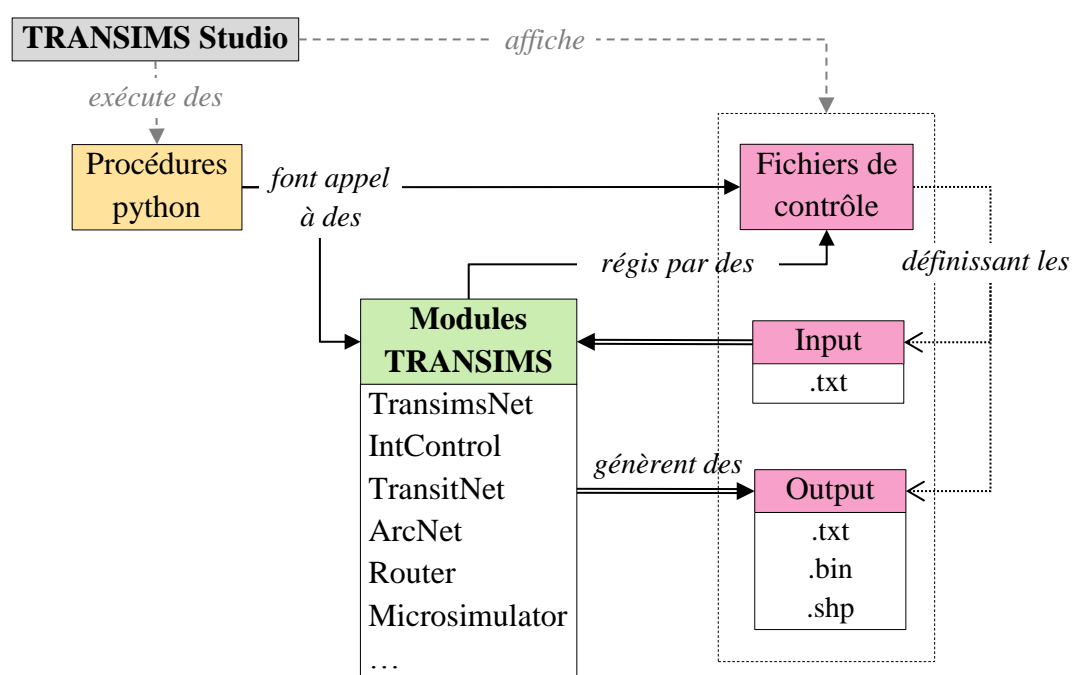


Figure 5-1: Organisation des éléments menant à de l'utilisation de TRANSIMS

⁶ Bien que des développements de TRANSIMS soient en cours, la dernière version de TRANSIMS Studio est compatible avec les modules de la version 4.

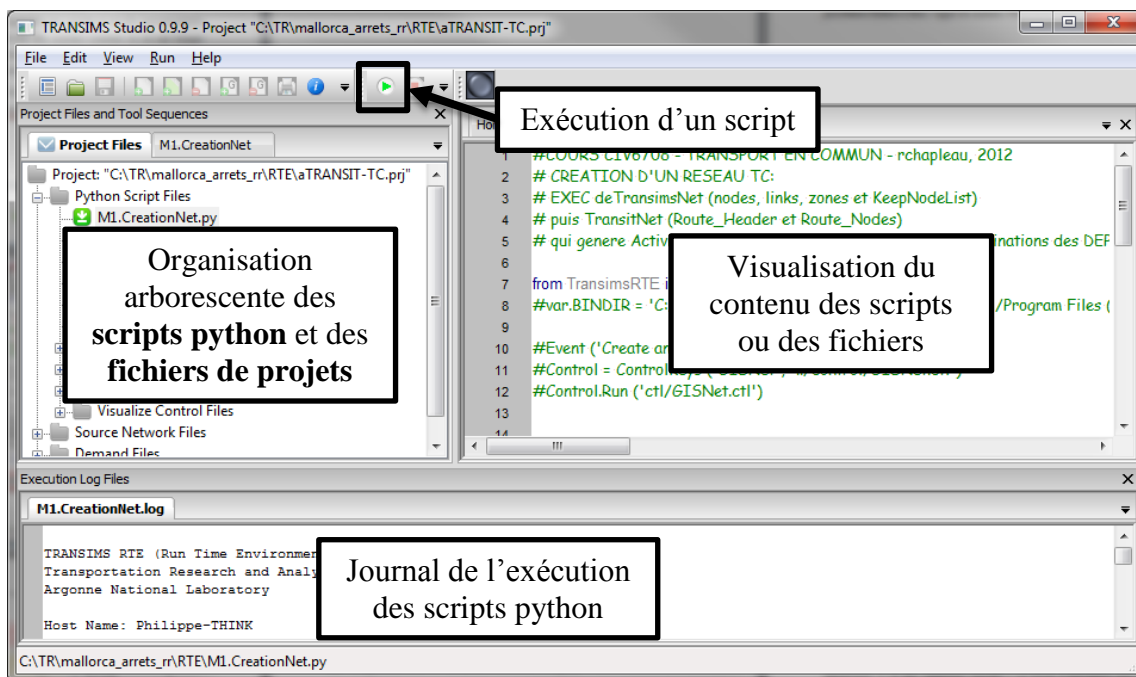


Figure 5-2: Capture de l'interface de TRANSIMS Studio

5.2 Éléments constitutifs du réseau

Préalablement au calcul d'itinéraires et à la réalisation de simulations, un réseau doit être défini. Celui-ci contient de l'information détaillée sur les rues, les intersections, la signalisation et le système de transport en commun. Le réseau routier, composé des nœuds et des liens, constitue l'élément central puisque c'est à partir de celui-ci que l'ensemble des activités est défini et qu'il soutient le réseau de transport en commun, ce dernier étant défini par quatre fichiers : les arrêts (*transit_stop*), les lignes d'autobus (*transit_route*), la séquence de liens empruntée pour chaque ligne (*transit_driver*) et les horaires de passage de chacune des lignes à chaque arrêt (*transit_schedule*). Son format de définition s'apparente donc à la structure des données des horaires de systèmes de transport collectif telles que stockées sous le format GTFS. La Figure 5-3 montre les principaux éléments constitutifs d'un réseau, les relations entre eux ainsi que leurs attributs principaux. Les informations de chaque objet sont enregistrées dans des fichiers textes individuels.

La Figure 5-4 schématise quant à elle l'organisation spatiale de ces éléments et ainsi la manière dont ils interagissent entre eux. Le passage d'un lien à un autre est réalisable par la

présence des connecteurs de liens (*lane_connectivity*), chaque connecteur définissant la possibilité de passage d'une voie particulière d'un lien à une voie d'un autre lien.

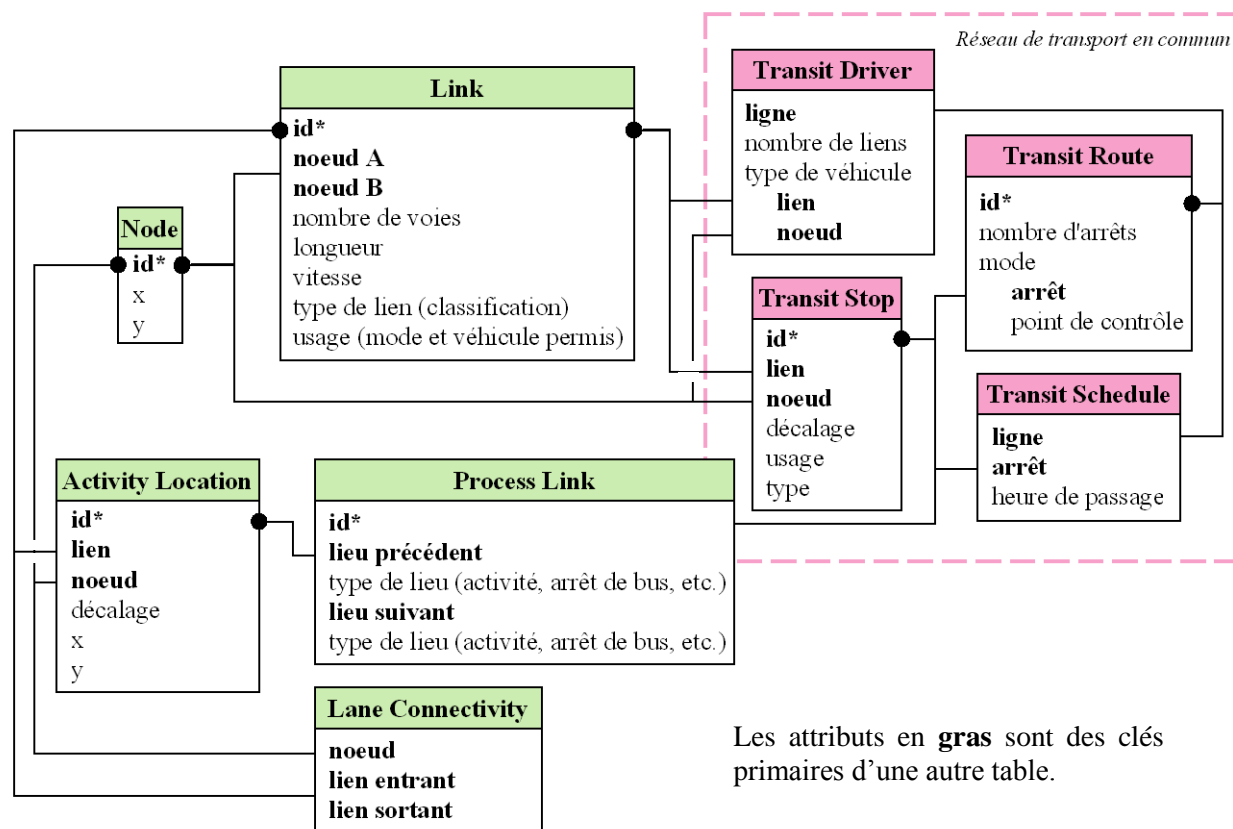


Figure 5-3: Éléments constitutifs d'un réseau avec leurs attributs principaux

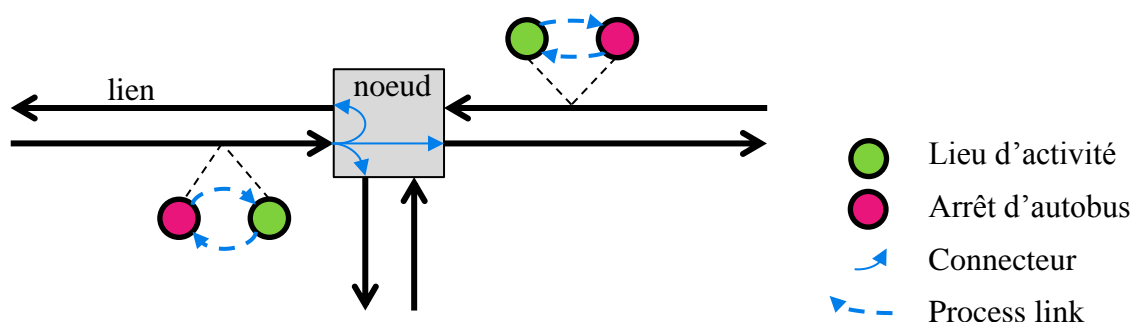


Figure 5-4: Représentation schématisée des éléments d'un réseau (figure adaptée de FHWA - TMIP, 2005)

Afin de permettre le calcul d'itinéraires, le réseau se doit d'être construit de manière cohérente pour assurer une connectivité entre les divers éléments. En effet, un déplacement est

constitué de plusieurs segments combinant différents modes sur diverses parties du réseau. Chaque segment est caractérisé par une durée et par une impédance propre, ayant donc un effet sur le calcul du coût généralisé de transport. Lors d'un déplacement en transport en commun, un voyageur marchera de son origine, un lieu d'activité (*activity location*), jusqu'à un arrêt d'autobus pour emprunter une ou plusieurs lignes, le menant à un arrêt de descente d'où il aura un segment de marche à réaliser pour finalement le mener à sa destination, un autre lieu d'activité (Figure 5-5). De manière conceptuelle, le réseau est composé de différentes couches uni-modales, c'est-à-dire qu'un mode de transport est associé à une couche en particulier, comme illustré à la Figure 5-6. La transition entre les différentes couches ou les différents modes de transport se fait à l'aide de liens nommés « process link », qui relient les différents lieux d'activité (*activity location*) au réseau routier.

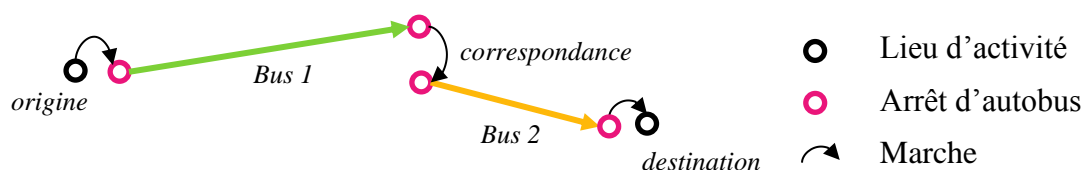


Figure 5-5: Schématisation d'un déplacement en transport en commun

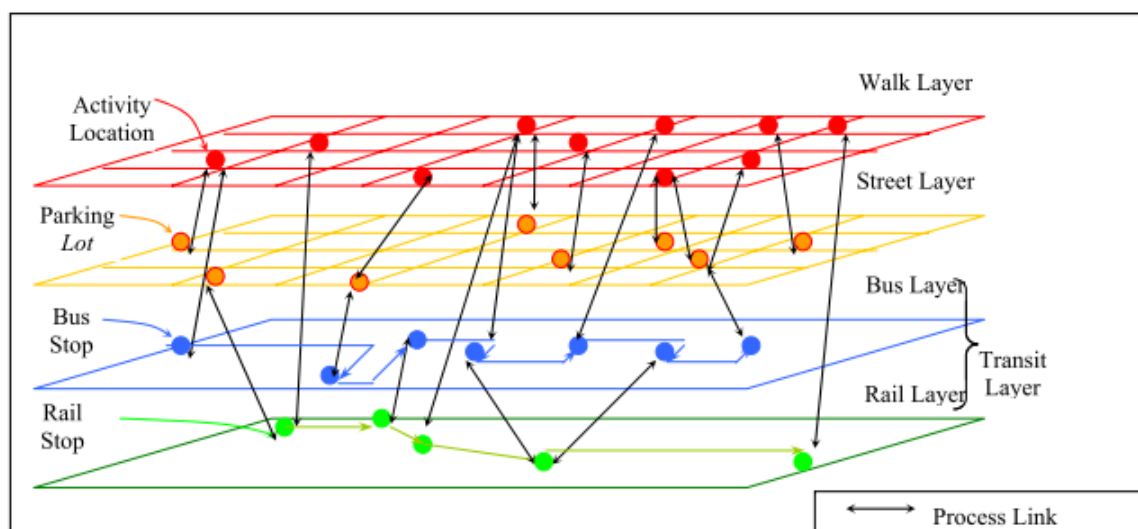


Figure 5-6: Représentation des différentes couches utilisées par TRANSIMS dans le calcul d'itinéraires (FHWA - TMIP, 2005)

Le prochain chapitre suggérera une méthode pour la codification d'un tel réseau dans TRANSIMS à partir de données exprimées sous le format GTFS

CHAPITRE 6 MICROSIMULATION

Ce chapitre vise à décrire une microsimulation réalisée dans TRANSIMS. Dans un premier temps, la procédure permettant le passage des données GTFS à un réseau routier sous le format TRANSIMS complétée d'une offre de transport collectif cohérente sera décrite. Une conversion des paires OD, estimées d'après les transactions de cartes à puce, pour l'obtention d'une demande à affecter sur le réseau sera aussi mentionnée.

Dans un deuxième temps, les résultats pouvant être tirés d'une affectation dynamique des déplacements et d'une microsimulation seront abordés.

6.1 Codification de l'offre

Tel que vu à la section 5.2, les deux éléments à la base d'un réseau sont les nœuds et les liens. TRANSIMS regroupe des modules permettant de générer les autres objets du réseau à partir de ces deux éléments, tout comme il contient un autre module permettant la génération de l'ensemble des fichiers nécessaires à l'établissement d'un service de transport en commun, suite à la conversion d'une liste de nœud définissant le trajet d'une ligne d'autobus. Or, dans les présentes expérimentations, ces modules seront court-circuités. L'offre de transport collectif étant connue de manière précise sous le format GTFS, l'ensemble des fichiers sera généré directement. Une procédure s'appuyant sur un fichier stop_times enrichi et générant automatiquement les fichiers requis par TRANSIMS a été développée (des extraits des différents fichiers produits sont présentés à l'Annexe E). Le principal défi en est un de gestion, d'organisation et de structuration des ensembles de données pour le développement d'une approche efficace et systématique. Il est indispensable que les entrants soient définis de façon stricte et que les sortants soient organisés de manière à ce que les résultats témoignent de leur plein potentiel.

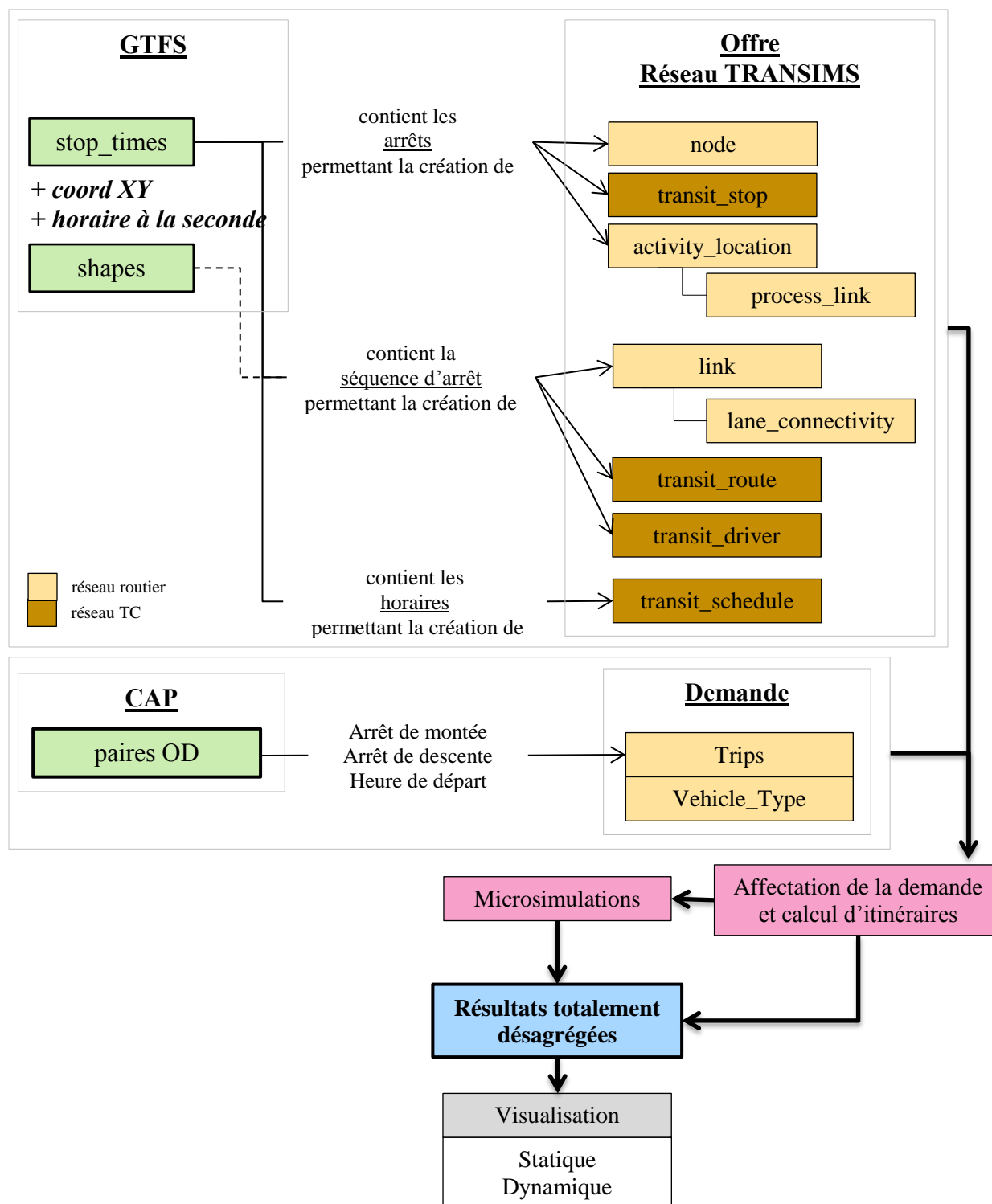


Figure 6-1: Schématisation des étapes liées à une microsimulation avec TRANSIMS

6.1.1 Préparation du réseau routier

Le réseau routier soutenant le réseau de transport de surface est codifié uniquement à partir des données GTFS. Divers essais de codification ont été abordés avant de sélectionner une approche en particulier. Cependant, l'absence d'informations strictes renseignant sur le lieu de l'arrêt dans les données exprimées sous le format GTFS empêche d'identifier des nœuds selon lesquels des arrêts pourraient être regroupés.

Une codification d'arrêt à arrêt est donc utilisée, les arrêts devenant les nœuds du réseau. Deux arrêts distincts dans les GTFS, mais possédant les mêmes coordonnées géographiques, c'est-à-dire étant positionnés au même endroit, sont regroupés en un seul nœud identifié par le `stop_code` de l'arrêt le plus petit. Un dictionnaire de correspondance est créé afin d'identifier le nœud désignant un arrêt. Ces nœuds sont reliés entre eux suivant l'ordre des tracés identifiés par la séquence d'arrêts empruntés par un véhicule, tel qu'exprimé dans le `stop_times`. Ces liens du réseau routier, unidirectionnels puisqu'un parcours en sens inverse emprunte une séquence d'arrêts différente⁷, sont identifiés par le même identifiant que le nœud de départ du lien, ajouté d'un numéro. Ce dernier sert à distinguer deux liens qui partiraient du même arrêt, mais ayant des nœuds de fin différents. Ce cas est retrouvé par exemple lorsque deux lignes passent par la même rue puis empruntent des trajets divergents. Les *shapes* présents dans le GTFS, soit la géométrie du tracé réalisé par une ligne-direction, sont utilisées pour définir la géométrie et la longueur des liens, de la même manière qu'ils ont été utilisés pour la création d'un horaire à la seconde à la section 3.2.2.3. TRANSIMS offre plusieurs types hiérarchiques pour la caractérisation des liens, chacun d'entre eux possédant des caractéristiques particulières influençant la circulation des véhicules sur ces liens. Étant donné que la simulation vise le transport d'autobus seulement, des liens de type local conviennent au contexte.

La Figure 6-2 schématise, à l'aide d'un SIG, les éléments du réseau et la codification des différents objets. Cette figure est produite à partir de *shapefile* (.shp) générés par TRANSIMS. On y retrouve notamment les *Activity_Location* et les *Transit_Stop* portant le même numéro que le lien sur lequel ils sont situés, lui-même étant numéroté à partir du nœud d'origine. La géométrie des liens illustrés y est simplifiée (les *shapes* ne sont pas utilisés) pour faciliter la

⁷ Les segments effectués à la marche sont aussi permis dans le sens inverse de la direction prescrite

compréhension. Un choix judicieux des identifiants des objets lors la codification facilite la compréhension des résultats, l'analyste pouvant ainsi mieux se situer et mettre à profit cette codification pour synthétiser les *outputs* de la simulation.

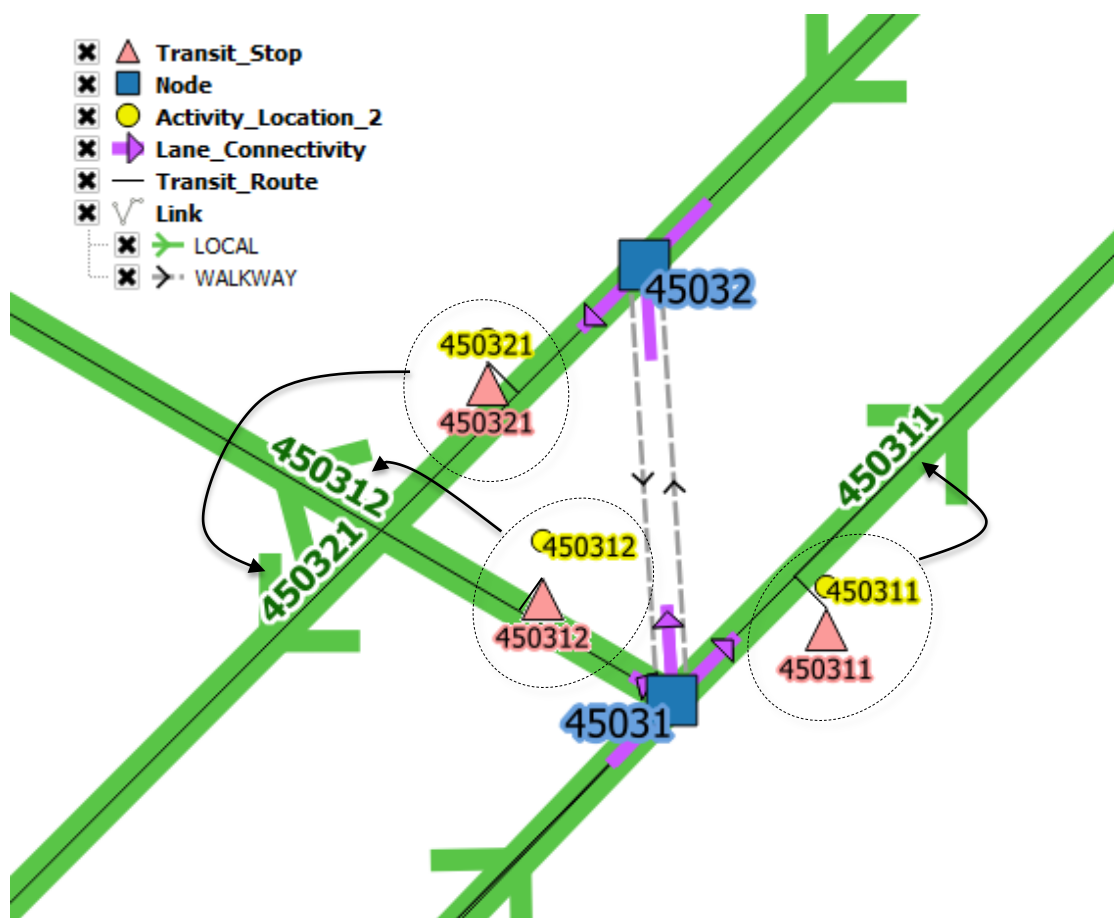


Figure 6-2: Représentation de la codification du réseau dans un SIG

Le passage d'un lien à un autre n'étant possible qu'aux nœuds du réseau, cette codification des nœuds aux arrêts ne permet pas nécessairement le passage d'un lien à un autre, bien qu'ils soient potentiellement liés à la même intersection du réseau routier physique existant. L'identification précise de ces intersections par regroupement des arrêts en un nœud n'est pas toujours possible en raison de l'inconsistance du nom des arrêts et du fait qu'une agrégation spatiale peut entraîner des regroupements non désirés. Ainsi, pour permettre les correspondances entre deux lignes d'autobus, des liens piétonniers sont créés entre les arrêts séparés par une distance de 100 mètres ou moins. Il est à noter que si deux nœuds respectent le critère précédent,

mais qu'ils sont déjà reliés par un lien routier, aucun lien piétonnier n'est créé puisque la nature locale du réseau routier permet aussi les mouvements de marche



Figure 6-3: Schéma du réseau codifié

6.1.2 Offre de transport en commun

L'offre de transport, construit évidemment à partir des données GTFS, sera définie dans un environnement *schedule-based*. À chaque nœud, représentant un poteau, sont positionnés un arrêt (*transit_stop*) et un lieu d'activité (*activity_location*). La codification des *routes*, c'est-à-dire des lignes-directions-tracés, est ensuite obtenue en définissant la séquence des arrêts parcourus. Les arrêts sont positionnés après l'intersection (*far-side*) et portent le même nom que le nœud à proximité et que le lien sur lequel il se trouve. De cette manière, chaque arrêt devient orienté, le lien sur lequel il se situe indiquant la direction du trajet.

Enfin, pour représenter la réalité opérationnelle du réseau, les horaires de passage aux arrêts (*transit_schedule*) sont définis en transposant les horaires contenus dans la table *stop_times* des GTFS. Chaque passage-arrêt est codifié, en utilisant le dictionnaire de correspondance des arrêts créé lors de la codification du réseau. L'horaire converti à la seconde (section 3.2.2.3) est employé pour des fins de cohérence.

Une des options offertes par TRANSIMS dans la codification de l'offre de transport consiste à ajouter des points de contrôle afin de s'assurer que le véhicule respecte l'horaire planifié. Chaque passage-arrêt est alors décrit comme un point de contrôle, exigeant du chauffeur qu'il attende l'heure de passage planifié s'il se trouve en avance.

Tableau 6-1: Nombre d'objets de chaque type constituant le réseau

Objet	Nombre
Node	2 623
Link	4 587
LOCAL	2 807
WALKWAY	1 780
Activity_Location	2 855
Process_Link	5 710
Lane_Connectivity	6 884
Transit_Stop	2 855
Transit_Route	115
Transit_Schedule	134 440

6.1.2.1 Validation du réseau

Une des manières de valider la connexité du réseau et donc de valider la capacité à trouver un chemin entre chaque lieu d'activité localisé sur le réseau consiste à générer une demande unitaire pour toutes les paires OD possibles à partir d'un point. Il s'agit de simuler le déplacement de 2 855 voyageurs, se destinant chacun à un lieu d'activité différent sur le réseau. Le lieu de départ commun sélectionné pour cet exercice est la station Cartier, un point central dont le terminus est utilisé par plusieurs lignes. La durée de voyage propre à chaque déplacement permet de générer, à l'aide d'un SIG, les isochrones des temps de parcours, tracés à la Figure 6-4. Cette figure montre les temps de parcours obtenus pour des déplacements débutant à 16:00:00 afin de représenter une situation où les usagers rentreraient à leur domicile, le résultat pouvant être différent pour une heure de départ différente. Ainsi, par exemple, en période d'après-midi, contrairement à la période de pointe AM, aucun service n'est offert pour se rendre aux stations Saint-Michel et Radisson dans l'est de Montréal, les déplacements n'ayant pu être complétés et les temps de parcours n'ayant ainsi pu être estimés.

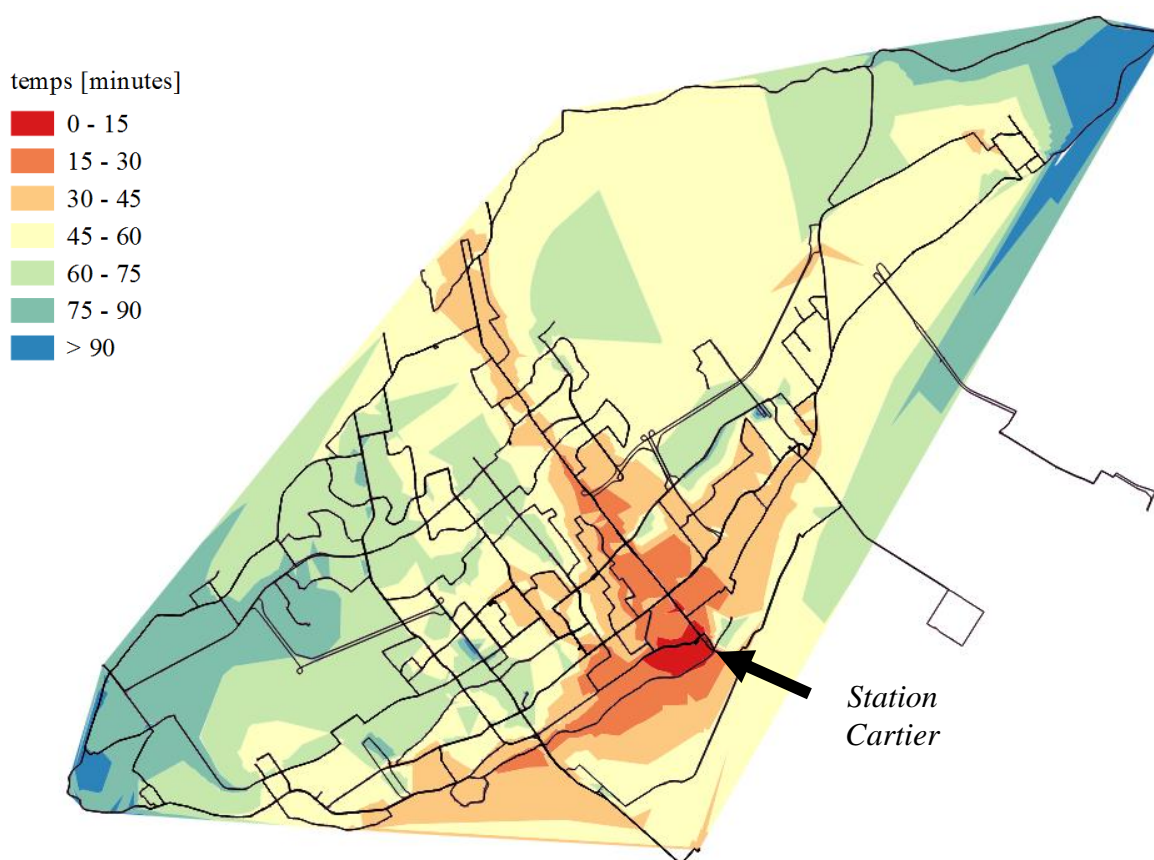


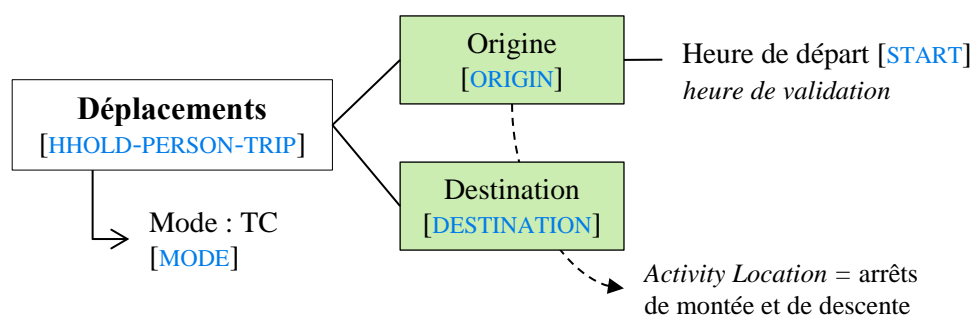
Figure 6-4: Isochrones des temps de parcours à partir de la station Cartier (départ à 16:00:00)

6.2 Demande

L'expérimentation portant sur l'utilisation du service de transport collectif de la STL, les données de validation du système de perception AFC d'une journée de semaine seront utilisées pour constituer la demande à affecter. Cette demande est définie déplacement par déplacement en spécifiant l'origine, la destination ainsi que l'heure de départ.

Deux types de demande peuvent être imaginés. Dans un premier temps, une demande est bâtie où chaque déplacement est construit à partir des segments de déplacement retrouvés dans les données de CAP, ce qui revient à produire un déplacement par transaction effectuée sur le réseau de la STL. Cette demande permet de recréer et de valider les taux d'occupation du réseau calculés directement à partir des informations de montées et de descentes. Un total de 68 553 déplacements serait donc modélisé.

Dans un deuxième temps, chaque déplacement recensé dans l'ensemble de données de CAP dont au moins un segment a été effectué sur le réseau de la STL est converti en un déplacement à affecter sur le réseau. Puisque l'intérêt est porté sur le réseau de la STL, les lieux d'origine et de destinations sont nécessairement des arrêts de la STL. Pour les déplacements débutant et se terminant dans la réalité sur un autre réseau que celui de la STL, par exemple sur le métro ou encore un autre opérateur d'autobus, seuls les segments effectués sur le réseau de la STL seront modélisés comme des déplacements. Cela implique que les lieux d'origine et de destination seront respectivement le premier arrêt de montée dans un véhicule de STL et l'arrêt correspondant à la descente du dernier segment effectué sur le réseau de la STL. Ce type de demande suscite un vif intérêt dans la mesure où il permet de calculer et de comparer les itinéraires complets des usagers, incluant les correspondances. Cette demande sera donc modélisée, comptabilisant un total de 59 113 déplacements. Il est à noter que l'heure de départ correspond à l'heure de la première transaction du déplacement soustrait de deux minutes afin d'accorder suffisamment de temps au voyageur pour atteindre l'arrêt avant le passage de l'autobus.



[ABC] : Attribut du fichier trips.txt

Figure 6-5: Éléments constitutifs de la demande

6.3 Résultats

Les résultats peuvent être séparés en deux grandes catégories. D'abord, l'affectation dynamique, *schedule-based*, des déplacements génèrent des résultats issus de calculs de chemins les plus courts. Ensuite, la microsimulation détermine la trace de chaque véhicule sur le réseau, permettant des visualisations dynamiques.

Il est à noter qu'aucune calibration du modèle de microsimulation n'a été réalisée. TRANSIMS, à l'aide de ses fichiers de contrôle, permet d'ajuster plusieurs paramètres influençant le comportement des usagers et des véhicules. Les impédances associées à chaque étape d'un déplacement (temps de marche, temps d'attente, temps en véhicule, correspondance) peuvent être adaptées afin de représenter plus adéquatement le comportement des usagers.

Par ailleurs, dans le cas actuel, mise à part la capacité de passagers des véhicules qui pourrait être altérée, les paramètres concernant les véhicules sont moins sensibles puisque les véhicules de transport en commun respectent un horaire planifié. Dans le cas éventuel où un réseau serait défini de manière à intégrer la circulation automobile afin de modéliser les impacts de la congestion sur le service de transport en commun, il devient nécessaire d'améliorer le niveau de détail du réseau, notamment en ce qui concerne la signalisation (feux de circulation, arrêt, etc.) ainsi que la capacité des liens routiers (par exemple le nombre de voies et la vitesse permise).

6.3.1 Affectation dynamique des déplacements

L'approche de la présente expérimentation permet de générer une multitude de résultats, sous divers formats, autant statiques que dynamiques. Le fait de procéder à des affectations dynamiques des déplacements n'écarte en rien la possibilité de produire des visualisations de transport de type classique. Les résultats d'une telle affectation favorisent au contraire le choix du niveau d'agrégation, et permettent, tant pour le réseau que pour les usagers, de générer à la fois des représentations statiques et globales que des résultats finement détaillés. Le Tableau 6-2 présente à cet effet divers types de résultats pouvant être générés.

Tableau 6-2: Résultats pouvant être tirés d'une affectation dynamique des déplacements

Usagers	Indicateurs globaux <ul style="list-style-type: none"> • Passagers-km • Passagers-heures • Correspondances
	Description de chaque segment de voyage <ul style="list-style-type: none"> • Marche • Attente • En véhicule
Véhicules	Demande pour chaque ligne
	Description de chaque voyage <ul style="list-style-type: none"> • Charge dans chaque véhicule, à chaque arrêt
Réseau	Demande aux arrêts
	Charge sur chaque lien

6.3.1.1 Résultats systémiques

Une compréhension globale du système peut être développée à l'aide d'indicateurs systémiques. D'abord, parmi les 59 113 déplacements modélisés, 58 896 (99.6%) empruntent au moins un autobus, les autres étant réalisés à la marche puisque le temps de parcours est jugé plus court que le temps d'attente et le temps en véhicule additionnés.

La Tableau 6-3 compare des indicateurs globaux issus de l'affectation aux valeurs calculées d'après l'estimation des lieux de montées et de descentes depuis les transactions de cartes à puce. L'augmentation des passagers-kilomètres parcourus accompagnée d'une diminution importante des passagers-heures est révélateur de la méthode d'affectation, priorisant un faible temps de parcours à la distance franchie.

Tableau 6-3: Indicateurs systémiques de l'affectation dynamique

	transactions de cartes à puce	affectation dynamique	différence
nombre de déplacements	59 113	58 896	-0.4%
nombre de segment TC*	1.16	1.15	-1.1%
passagers-kilomètres	473 475	479 718	+1.3%
passagers-heures	20 449	19 043	-6.9%

*nombre moyen de segments de ligne empruntés

En plus des indicateurs usuels et généraux (voir l'Annexe F pour un exemple de résultat synthétique produit par TRANSIMS), il est possible d'obtenir, pour chacun de ces usagers, la description de son voyage étape par étape, qu'il soit dans un véhicule ou non. Il est possible de distinguer les segments d'accès au premier arrêt de montée, du lieu de descente vers la destination ainsi que de correspondance entre deux véhicules, tout en identifiant leur durée et le moment où ils surviennent. Ces temps hors-véhicule combinent le temps de marche ainsi que le temps d'attente. Le planificateur est laissé libre de compiler les résultats selon l'analyse souhaitée, par exemple pour étudier les comportements d'usagers partant d'un endroit particulier, ou encore pour analyser l'accessibilité du réseau.

Le Tableau 6-4 scinde les déplacements issus de l'affectation en segments et les dénombre. La Figure 6-6 montre quant à elle la distribution de ces segments en fonction de leur durée. Il est possible de constater qu'environ 87% des déplacements ont un temps de correspondance nul, ce qui correspond aux voyageurs n'empruntant qu'un segment de ligne pour

atteindre leur destination. Les temps de sortie sont pratiquement négligeables, les voyageurs descendants à l'arrêt le plus prêt de la destination. À l'opposé, certains temps d'accès peuvent s'avérer considérables lorsque l'affectation construit des itinéraires qui diffèrent de ceux établis avec les données de cartes à puce, nécessitant ainsi des distances de marche.

Tableau 6-4: Division des déplacements issus de l'affectation dynamique par segments

	nombre de segments	durée moyenne du segment (minutes)	passagers-heures
segments d'accès au premier arrêt	58 896	2.2	2 201
segments en véhicule	67 556	16.9	19 043
segments en correspondance	8 670	8.8	1 272
segments de sortie vers la destination	56 954	0.1	99
total	194 018	22 615	22 615

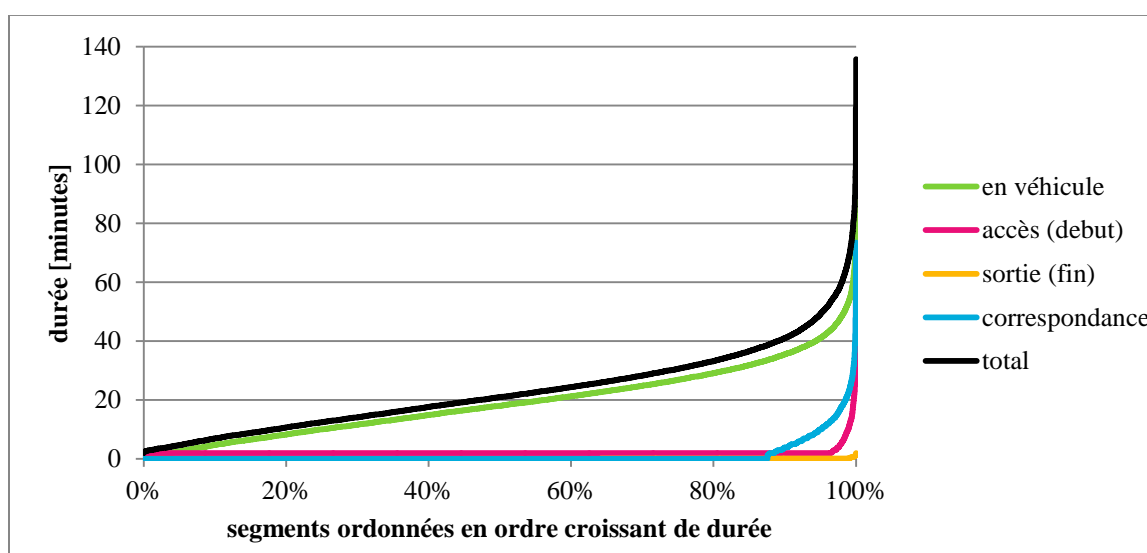


Figure 6-6: Distribution des durées de chaque type de segment

6.3.1.2 Analyse d'un voyage

L'affectation dynamique, générant les parcours individuels de chaque voyageur, permet d'obtenir, pour chaque voyage planifié, le nombre de montants et de descendants aux différents arrêts. La Figure 6-7 compare le profil de charge obtenu avec celui établi directement à partir des lieux de montée et de descente estimés depuis les transactions de cartes à puce. Le profil est typique d'un voyage en période d'après-midi partant du terminus Montmorency, le véhicule se

remplissant au départ pour disperser les usagers vers les lieux plus excentrés de Laval. Les deux profils présentent une allure similaire, mais différent tout en même, en particulier en terme du nombre de montants total. Cette comparaison illustre les différences pouvant exister entre une affectation basée sur le chemin le plus court et les observations tirées d'un système de perception.

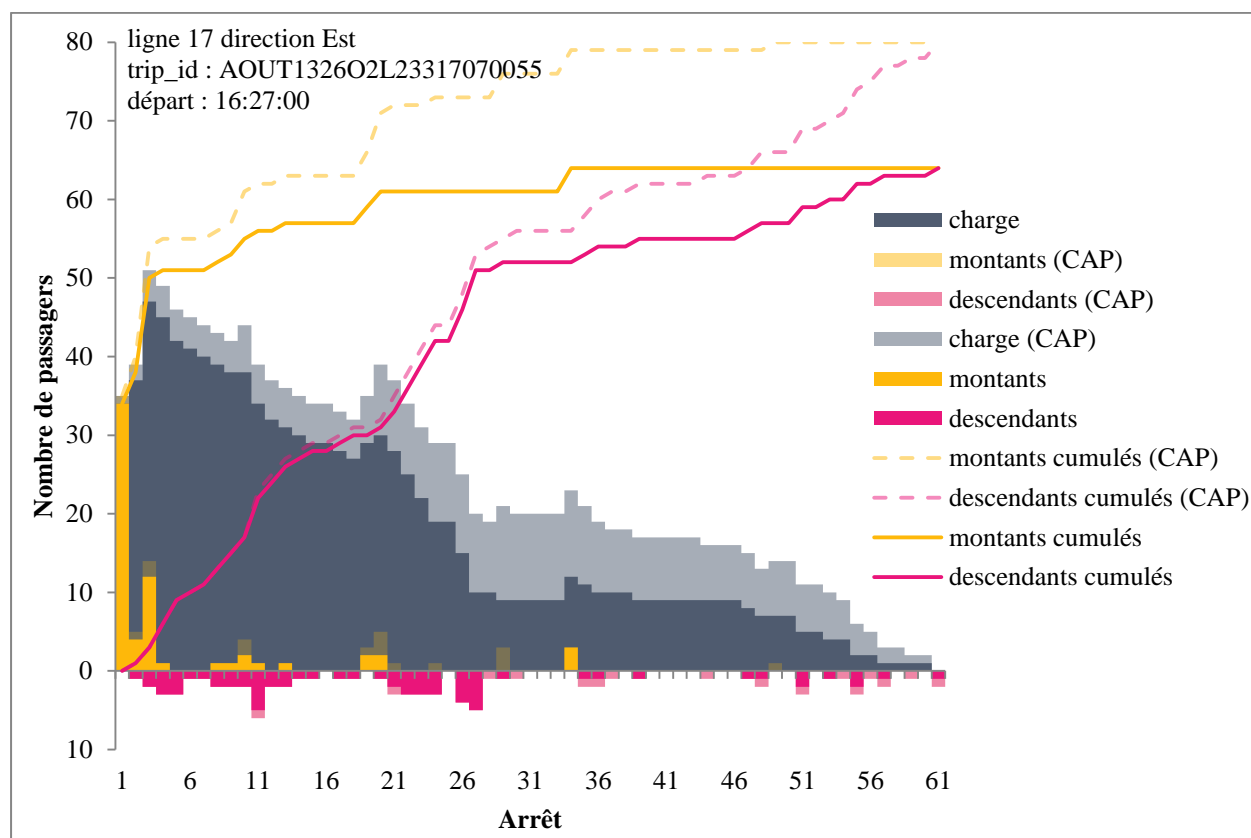


Figure 6-7: Comparaison d'un profil de charge issu d'une affectation avec celui obtenu des lieux de montées et de descentes estimés à partir des transactions de CAP

6.3.1.3 Représentation spatiale

Un des avantages de la suite d'outils TRANSIMS est sa capacité à générer des *shapefiles*. Dans un contexte où les SIG font désormais partie intégrante des outils du planificateur, cette fonctionnalité devient un moyen efficace d'obtenir une compréhension globale du système.

Parmi les *shapefiles* produits, des polygones représentant l'achalandage cumulé sur chaque lien permettent d'illustrer le profil de charge sur l'ensemble du réseau. Ce type de représentation met en évidence une limitation de la codification d'arrêt à arrêt. En effet, la situation où deux lignes parcourant le même tronçon d'un réseau routier réel, mais ne s'arrêtant

pas aux mêmes arrêts, aura pour effet de générer deux liens distincts lors d'une telle modélisation. Le profil de charge n'est donc plus représentatif de l'achalandage complet du lien, mais le divise et rend l'analyse plus ardue.

D'autres *shapefiles* permettent de montrer, comme affiché avec une troisième dimension à la Figure 6-8, l'achalandage de chaque arrêt et d'explorer spatialement l'utilisation des infrastructures.

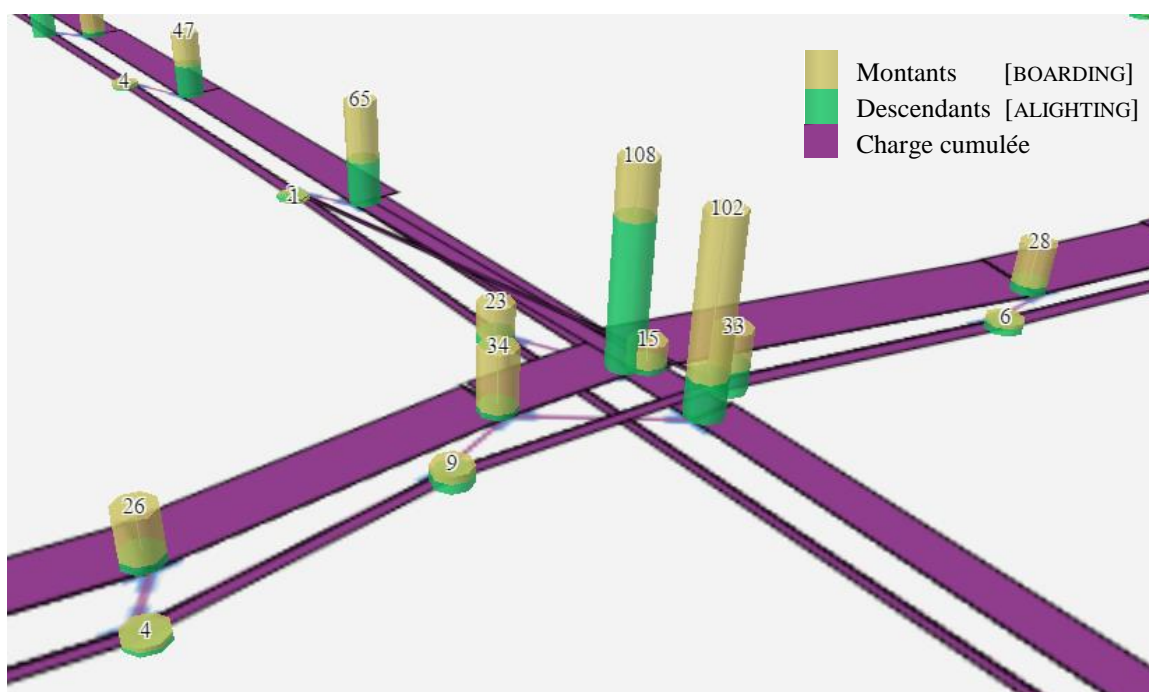


Figure 6-8: Exemple de visualisation des résultats dans un SIG à partir de *shapefiles* produits par TRANSIMS

6.3.2 Microsimulation

L'évolution des logiciels de microsimulation s'accompagne du développement d'outils permettant la visualisation dynamique des résultats. TransimsVIS, un instrument conçu spécifiquement pour visualiser les résultats d'une microsimulation réalisée avec TRANSIMS, offre la possibilité de suivre temporellement chaque véhicule et de constater l'état du réseau.

Son interface, tel qu'illustré à la Figure 6-9, offre de multiples possibilités quant à la mise en forme pouvant être appliquées aux véhicules, notamment en ce qui a trait à leur couleur, leur forme et leur nombre. La mise en forme peut aussi être conditionnelle à certains attributs dont la

valeur varierait temporellement, par exemple en colorant le véhicule selon sa vitesse ou en l'encadrant d'un polygone indiquant le nombre de passagers y étant transportés dans le cas d'un véhicule de transport en commun. De plus, parmi ses diverses fonctionnalités, TransimsVIS permet d'ajouter des *shapefiles* de lignes ou de polygones pour agrémenter la trame de la visualisation. La navigation peut se faire sous différents points de vue et en changeant la perspective pour une meilleure appréciation des résultats. Enfin, des utilitaires autorisant l'ajout de cartes de chaleur pour visualiser les points de congestion ou la génération de feux de circulation animés et dynamiques peuvent à leur tour contribuer à enrichir la compréhension des résultats.

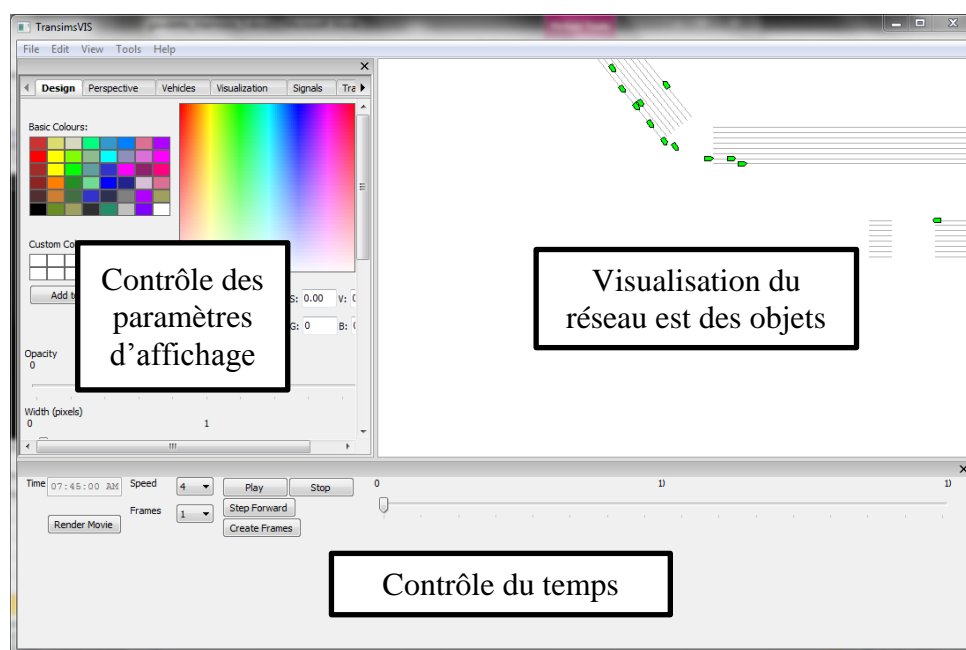


Figure 6-9: Capture de l'interface de TransimsVIS

L'utilisation de tels outils engendre un potentiel d'analyse pour l'investigation de situations particulières autrement difficilement identifiables. La Figure 6-10, une capture d'une animation des résultats de la simulation, montre chacun des autobus de la STL en service à un moment précis avec une indication de leur charge respective. Cette animation rend compte du haut niveau de résolution temporelle de la modélisation et permet d'observer les mouvements véhiculaires seconde par seconde.

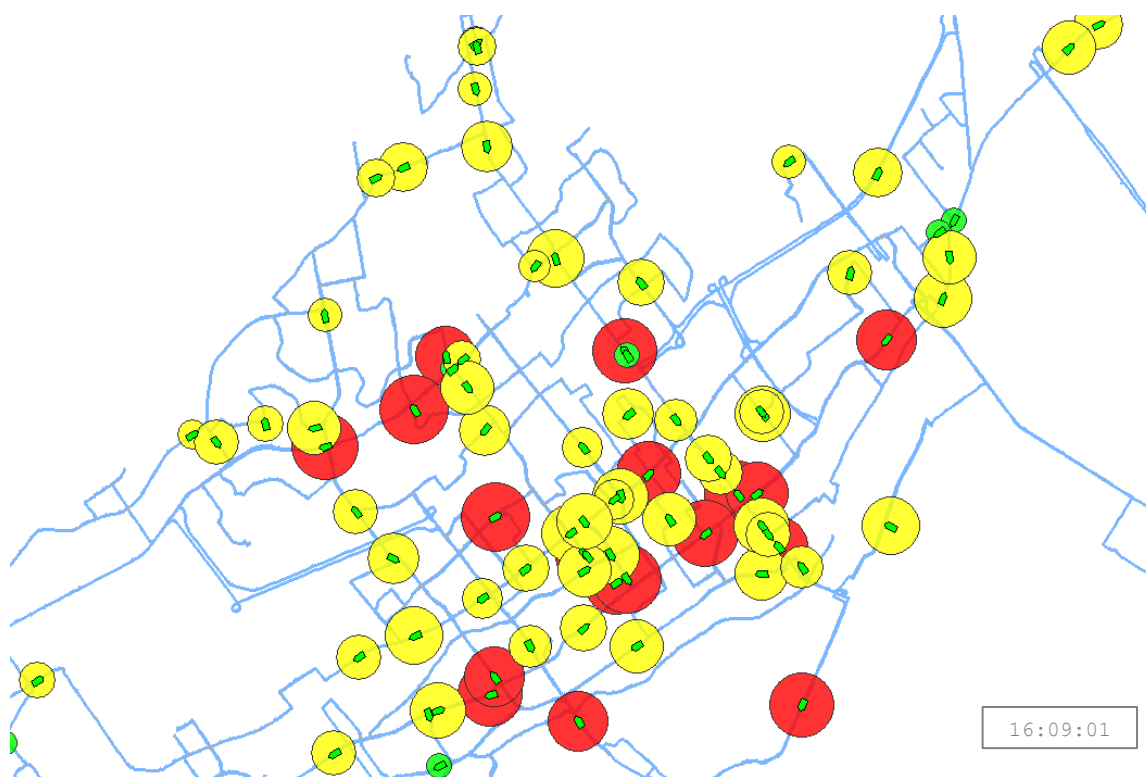


Figure 6-10: Capture d'une animation de la microsimulation réalisée avec TransimsVIS

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Cette dernière section vise à résumer les principaux travaux de ce projet de recherche tout en identifiant les perspectives de recherches futures, puisque ce projet de recherche ne constitue qu'un pas dans un grand cheminement d'intégration des données de perception et celles des horaires planifiés visant l'amélioration des outils de planification.

7.1 Résultats

D'abord, dans un contexte d'augmentation du nombre d'instruments de mesures et de contrôle générant des ensembles de données de plus en plus imposants, situation n'épargnant pas le domaine des transports urbains, le défi et l'opportunité d'améliorer les modèles et les approches de planification existants se présentent. Les enquêtes OD sur lesquelles s'appuie la modélisation sont appelées à être complémentées par de nouveaux systèmes.

Ce projet a donc mené, en intégrant deux principaux ensembles de données, à la modélisation et la microsimulation du réseau de transport de surface de la Société de transport de Laval à l'aide de l'outil TRANSIMS. À partir du format standardisé des horaires planifiés d'un système de transport collectif défini dans le format GTFS, proposant de manière ouverte les informations décrivant la géométrie et les horaires de transport, une offre de transport composée d'un réseau routier soutenant un service de transport en commun a été codifiée.

Par la suite, l'expérimentation de méthodes visant l'estimation des lieux de descente a conduit à l'appréciation du potentiel des ensembles de données de validation des titres de transport dans la constitution d'une demande de transport. L'étude du cas de la STL a montré la possibilité de dériver les lieux de montée et de descente des usagers à partir de l'ensemble des transactions réalisées avec leurs supports, tant sur le réseau de surface qu'aux stations de métro. Pour un système de transport collectif d'autobus dont la majorité des lignes proposent une correspondance avec un système lourd comme le métro, il est permis d'estimer des paires origine-destination en se basant sur les correspondances entre ces deux réseaux, dont un est spatialement défini avec certitude. Un traitement systématique de la chaîne de transactions dévoile ainsi la richesse des données de cartes à puce, autorisant la construction d'une demande complètement désagrégée entraînant un potentiel d'analyses détaillées.

La présence d'une offre codifiée et d'une telle demande permet de procéder à une affectation dynamique des déplacements. Cette affectation, réalisée ici avec TRANSIMS, génère des résultats multiples et sous divers formats favorisant une compréhension plus fine du système. Enfin, une microsimulation est accomplie, permettant la visualisation animée des véhicules ainsi que de leur charge et admet l'observation de l'évolution spatio-temporelle de l'achalandage du réseau. L'utilisation de ces instruments, avec une procédure traduisant automatiquement les données d'horaire planifié sous le format GTFS en une offre de transport, peut devenir un nouvel outil pour les planificateurs dans la réorganisation du réseau et des horaires. En testant divers alternatives et scénarios, l'affectation et la microsimulation permet de développer une meilleure compréhension du système et d'évaluer les impacts de modifications apportées à l'offre de service.

7.2 Perspectives

L'exploration de méthodes permettant d'estimer les lieux de montées et de descente a été appliquée au contexte d'une agence de transport en particulier, mais oriente des recherches subséquentes conduisant à des analyses avec des perspectives multiples. Par exemple, l'identification des lieux de destination de l'ensemble des déplacements faits en transport en commun par les résidents d'un secteur, notamment lorsque des réseaux multiples sont empruntés, donnerait lieu à une nouvelle compréhension des comportements et de l'utilisation des réseaux. L'utilisation des données issues d'un système de perception par cartes à puce pourrait à cet égard influencer la méthode de partage des recettes entre diverses agences de transport. Le niveau de résolution des données AFC, dont l'échantillon étudié des usagers utilisant les services de transport en commun constitue la population entière, additionné de la connaissance des titres de transport utilisés par chacun des individus, deviendrait une alternative plus précise aux données provenant des enquêtes origine-destination. L'étude approfondie des transactions d'une station de métro, en conjonction avec le réseau de surface s'y rattachant, engendre aussi une nouvelle manière de caractériser un secteur.

La méthode présentée permettant d'estimer des lieux de montée et descente présente toutefois quelques incertitudes. L'intégration de sources de données supplémentaires permettrait la validation de l'aspect spatial de la demande dérivée du système AFC, notamment par l'utilisation des traces GPS et des comptages de passager provenant des systèmes AVL-APC

installés dans les véhicules (Lomone, 2014). De plus, avec des données de la Société de transport de l'Outaouais, il a par ailleurs été montré que l'emploi de données issues de plusieurs jours permet de reconstruire les itinéraires des déplacements des usagers (Chu, 2010), astuce qui pourrait être mise à contribution pour obtenir un meilleur niveau de précision dans l'identification des origines et des destinations.

Le niveau de résolution d'un jeu de données résultant de transactions de cartes à puce, recensant individuellement chaque usager, n'est inégalé par aucun autre type d'enquête. Cependant, ces données ne tiennent pas compte des aspects socioéconomiques des déplacements. Une juxtaposition des données issues de systèmes ADC à des générateurs de déplacements connus, par exemple tirés des enquêtes OD, deviendrait une stratégie menant à une meilleure caractérisation des comportements de déplacement.

Dans le contexte de l'affectation des déplacements, les différents paramètres intervenant dans le choix d'itinéraires des usagers pourraient aussi être ajustés. La calibration des multiples paramètres d'impédances aurait un impact sur l'affectation des déplacements, qui pourrait s'accorder aux choix réels des usagers.

Dans le cadre de ce projet, la modélisation s'est attardée à un réseau de transport collectif. Or, les mouvements des véhicules d'un réseau de surface sont souvent contraints par le trafic routier. L'intégration d'un réseau multimodal incorporant la circulation automobile enrichirait alors le modèle et deviendrait un outil supplémentaire pour la planification opérationnelle. Il représenterait plus fidèlement la réalité du service de transport d'autobus, constamment en interaction avec les autres véhicules, et permettrait de modéliser l'aspect de la ponctualité. La codification du réseau routier devrait alors nécessairement être réalisée de manière à assurer une cohérence entre l'offre de transport collectif et les tronçons routiers, ce qui impliquerait une codification différente que celle d'arrêt à arrêt. Des *shapefiles* de réseaux routiers réels avec leurs attributs (nombre de voies, vitesse permise, etc.) pourraient être utilisées, sur lesquelles devrait être codifiée l'offre de service. Une demande pour générer des mouvements automobiles pourrait aussi être constituée, par exemple à l'aide des informations contenues dans les données d'enquêtes OD, ou encore avec des informations tirées de comptages routiers. Les instruments de microsimulation, comme TRANSIMS, permettent en outre d'intégrer des feux de circulation avec

des temps de phase spécifiques, influençant les temps de parcours et l'occupation des liens routiers.

Le format GTFS est conçu pour transmettre de l'information à l'utilisateur, mais son usage répandu et son caractère standardisé lui donnent le potentiel d'être utilisé comme outil de planification. Cependant, pour y arriver, il se doit d'être enrichi, spécialement au niveau spatial avec une définition stricte du lieu où se trouvent les arrêts, facilitant leur regroupement en nœuds et donc l'adéquation avec un réseau routier réel. De plus, spécifiquement au cas de la grande région de Montréal, les différentes AOT auraient intérêt à uniformiser leur caractérisation GTFS. Leurs données pourraient ainsi être plus facilement intégrées dans le développement de modèles de planification, contribuant à la résolution de problèmes complexes comme le partage des revenus.

Finalement, les résultats obtenus avec TRANSIMS sont issus d'un modèle d'affectation *schedule-based*. La comparaison avec un modèle d'affectation *frequency-based*, par exemple MADITUC, permettrait, pour une même demande, de mettre en perspective les résultats. Elle permettrait d'apprécier les différences et de mieux juger de la pertinence de l'utilisation de ces nouvelles méthodes dans le cadre de la planification.

BIBLIOGRAPHIE

- Bagchi, M., & White, P. (2005). The potential of public transport smart card data. *Transport Policy*, 12(5), 464-474.
- Blythe, P. T. (2004). Improving public transport ticketing through smart cards. *Proceedings of the ICE-Municipal Engineer*, 157(1), 47-54.
- Bouman, P. (2012). *Recognizing demand patterns from smart card data for agent-based micro-simulation of public transport*. (School of Management, Department of Decision and Information Sciences, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands).
- Bradley, M., Bowman, J. L., & Griesenbeck, B. (2010). SACSIM: An applied activity-based model system with fine-level spatial and temporal resolution. *Journal of Choice Modelling*, 3(1), 5-31.
- Castiglione, J., Bradley, M., & Gliebe, J. (2014). *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer*.
- Cerema. (2013). TRANSMODEL : une norme pour les bases de données. *Portail billettique*. Tiré de <http://www.billettique.fr/spip.php?rubrique18>
- Chapleau, R. (1992). *La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée*. Communication présentée à World Conference on Transportation Research Proceedings (p. 937-948).
- Chapleau, R. (2013). *Potential of open data and open source software for transit service planning : case of the Montreal Subway micro-simulation*. Communication présentée à Congrès 2013 de l'Association Canadienne du Transport Urbain, St-John's, NL.
- Chapleau, R., & Allard, B. (2010). *Merging AFC, APC, GPS and GIS-T data to generate productivity indicators and travel demand models in public transit*. Communication présentée à 12th World Conference on Transportation Research, Lisbonne, Portugal.
- Chapleau, R., Allard, B., & Canova, M. (1982). *MADITUC, un modèle de planification opérationnelle adapté aux entreprises de transport en commun de taille moyenne* (vol. 265). Montréal: Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal.
- Chapleau, R., & Piché, D. (2009). *AGIRAS-TU: Approche Globale Intégrée de Recherche et d'Analyse Systémique du Transport Urbain*. Communication présentée à 44e Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes, Montréal.

- Chapleau, R., Trépanier, M., & Chu, K. K. (2008). *The ultimate survey for transit planning: Complete information with smart card data and GIS*. Communication présentée à 8th International Conference on International Steering Committee for Travel Survey Conferences, Lac d'Annecy, France.
- Chu, K. K. (2010). *Leveraging data from a smart card automatic fare collection system for public transit planning*. (Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). (441). Tiré de <http://publications.polymtl.ca/441/>
- Chu, K. K., & Chapleau, R. (2008). Enriching archived smart card transaction data for transit demand modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2063(1), 63-72.
- Chu, K. K., Chapleau, R., & Trépanier, M. (2009). Driver-Assisted Bus Interview: Passive Transit Travel Survey with Smart Card Automatic Fare Collection System and Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2105(1), 1-10.
- Doucet-Koussaya, W. (2012). *Analyse exploratoire de transactions de cartes à puces sur le réseau du métro de Montréal*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). (875). Tiré de <http://publications.polymtl.ca/875/>
- Federal Highway Administration - Travel Model Improvement Program (TMIP). (2005). *Chapter 2 - TRANSIMS Network Data Files*.
- Ferris, B., Watkins, K., & Borning, A. (2010). *OneBusAway: Results from Providing Real-Time Arrival Information for Public Transit*.
- Furth, P. G., Hemily, B., Muller, T. H. J., & Strathman, J. G. (2006). *Using Archived AVL-APC Data to Improve Transit Performance and Management* (Rapport n° R-113). Washington, D.C.: Transit Cooperative Research Program.
- Google. (2014a). General Transit Feed Specification Reference. *Google Developers — Transit*. Tiré de <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference>
- Google. (2014b). Other GTFS Tools - A list of other software that read and write GTFS files. *Google Project Hosting*. Tiré de <https://code.google.com/p/googletransitdatafeed/wiki/OtherGTFSTools>
- Google. (2014c). What is GTFS? *Google Developers — Transit*. Tiré de <https://developers.google.com/transit/gtfs/>

- Google Project Hosting. (2013). TRANSIMS - An Open Source Transportation Modeling and Simulation Toolbox. Tiré de <https://code.google.com/p/transims/>
- He, L. (2014). *Contributions à l'amélioration d'un algorithme d'estimation des destinations des déplacements unitaires dérivées des validations d'un système de perception par carte à puce*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). (1492). Tiré de <http://publications.polymtl.ca/1492/>
- Khani, A. (2013). *Models and Solution Algorithms for Transit and Intermodal Passenger Assignment (Development of FAST-TrIPs Model)*. (University of Arizona).
- Kitamura, R., Chen, C., Pendyala, R. M., & Narayanan, R. (2000). Micro-simulation of daily activity-travel patterns for travel demand forecasting. *Transportation*, 27(1), 25-51.
- Kwan, M.-P. (2000). Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1), 185-203.
- Ley, H. (2010). *Advanced TRANSIMS User Interfaces - TRANSIMS Studio and the RTE Run Time Environment*. Communication présentée à TRANSIMS: Applications and Development Workshop, Transportation Research and Analysis Computing Center. Tiré de <https://www.tracc.anl.gov/images/TRACC/training-images/tsm/april-8/Transims%20Studio.pdf>
- Lomone, A. (2014). *Exploration et traitement multidonnées appliqués à des corridors d'autobus*. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). (1357). Tiré de <http://publications.polymtl.ca/1357/>
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., & Byers, A. H. (2011). *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. McKinsey Global Institute.
- Moeckel, R., Schwarze, B., Spiekermann, K., & Wegener, M. (2007). *Simulating interactions between land use, transport and environment*. Communication présentée à 11th world conference on transport research. University of California, Berkeley (p. 24-28).
- Müller, K., & Axhausen, K. W. (2010). *Population synthesis for microsimulation: State of the art*. Communication présentée à Swiss Transport Research Conference, Zurich, Suisse.
- Munizaga, M. A., & Palma, C. (2012). Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin-Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24 9-18.

- Normes Données TC. (2014). Neptune. *Le portail des normes pour les données d'offre du transport collectif*. Tiré de <http://www.normes-donnees-tc.org/category/neptune/>
- Nuzzolo, A., Russo, F., & Crisalli, U. (2001). A Doubly Dynamic Schedule-Based Assignment Model for Transit Networks. *Transportation Science*, 35(3), 268-285.
- Pelletier, M.-P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557-568.
- Pendyala, R. M., Chiu, Y.-C., & Waddell, P. (2008). Modeling the Urban Continuum in an Integrated Framework: Location Choice, Activity-Travel Behavior, and Dynamic Traffic Patterns. *Interim Report, Exploratory Advanced Research Program, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC*.
- Pendyala, R. M., Konduri, K. C., Chiu, Y.-C., Hickman, M., Noh, H., Waddell, P., . . . Gardner, B. (2012). Integrated land use-transport model system with dynamic time-dependent activity-travel microsimulation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2303(1), 19-27.
- Puchalsky, C. M., Joshi, D., & Scherr, W. (2012). *Development of a regional forecasting model based on Google transit feed*. Communication présentée à Transportation Research Board 91st Annual Meeting.
- Salvini, P., & Miller, E. J. (2003). ILUTE: An operational prototype of a comprehensive microsimulation model of urban systems. *Networks and Spatial Economics*, 5(2), 217-234.
- Slavin, H., Rabinowicz, A., Brandon, J., Flammia, G., & Freimer, R. (2009). Using Automated Fare Collection Data, GIS, and Dynamic Schedule Queries to Improve Transit Data and Transit Assignment Model. Dans N. H. Wilson & A. Nuzzolo (Édit.), *Schedule-Based Modeling of Transportation Networks* (p. 101-118). New York: Springer.
- Société de transport de Laval. (2014). *Rapport d'activités 2013*. Tiré de http://www.stl.laval.qc.ca/userfiles/files/pdf/Rapport_dactivites_2013.pdf
- Société de transport de Laval. (2015a). En bref - STL. Tiré de <http://www.stl.laval.qc.ca/fr/a-propos-de-la-stl/en-bref/>
- Société de transport de laval. (2015b). Grille tarifaire - STL. Tiré de <http://www.stl.laval.qc.ca/fr/tarification/grille-tarifaire/>

- Société de transport de Laval. (2015c). Renseignements généraux - STL. Tiré de <http://www.stl.laval.qc.ca/fr/tarification/renseignements-generaux/>
- Sokolov, V. (2010). *The Schedule-Based transit model of the Chicago Metropolitan Area*. Communication présentée à TRANSIMS: Applications and Development Workshop, TRACC-Argonne.
- SourceForge. (2013). TRANSIMS Studio. Tiré de <http://sourceforge.net/projects/transimsstudio/>
- Spurr, T., Chapleau, R., & Bisailon, G. (2013). *Direct schedule-based assignment of smart-card trips to a GTFS transit network*. Communication présentée à World Conference on Transportation Research Rio de Janeiro, Brésil.
- Spurr, T., Chapleau, R., Chu, K. K., & Doucet-Koussaya, W. (2012). *Smart Cards, GIS, GTFS and TRANSIMS : a Plot for the Dynamic Microsimulation of the Montreal Subway*. Communication présentée à 13th International Conference on Travel Behaviour Research, Toronto.
- Spurr, T., Chapleau, R., & Piché, D. (2013). *Animation tools for the microsimulation of a public transport network*. Communication présentée à 13th World Conference on Transportation Research Rio de Janeiro, Brésil.
- TFResource. (2015). Travel Forecasting Resource. Tiré de http://tfresource.org/Travel_Forecasting_Resource
- Trépanier, M., Tranchant, N., & Chapleau, R. (2007). Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 11(1), 1-14.
- Volosin, S. E., Paul, S., Pendyala, R. M., Grady, B., & Gardner, B. (2012). *The Application of a Microsimulation Model System to the Analysis of a Light Rail Corridor: Insights From a TRANSIMS Deployment*. Communication présentée à Transportation Research Board 91st Annual Meeting.
- Weiss, A., Mahmoud, M. S., Kucirek, P., & Habib, K. N. (2013). *Issues and Strategies Involved in Developing Agent-Based Multimodal Network Simulation Model for Transportation Planning: Lessons from a Case Study on the Greater Toronto and Hamilton Area*. Communication présentée à Congrès 2013 de l'Association des transports du Canada, Winnipeg, Manitoba.
- Wofinden, D. (2003). Non-Household Surveys. Dans P. Stopher & P. Jones (Édit.), *Transport Survey Quality and Innovation* (p. 377-402). Oxford, United Kingdom: Pergamon Press.

- Wolfson, O., & Xu, B. (2010). Spatio-temporal Databases in Urban Transportation. *IEEE Data Eng. Bull.*, 33(2), 18-25.
- Zeng, Q., Reddy, A. V., Lu, A., & Levine, B. (2015). *Develop New York City Surface Transit Boarding and Alighting Ridership Daily Production Application Using Big Data*. Communication présentée à Transportation Research Board.
- Zhao, J., Rahbee, A., & Wilson, N. H. (2007). Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(5), 376-387.

ANNEXE A – EXTRAIT D’UN FICHIER STOP_TIMES ENRICHI

Les attributs colorés ont été ajoutés au fichier stop_times initial.

trip_id	arrival_time	departure_time	stop_id	stop_sequence	pickup_type	drop_off_type	ligne	direction	trace	CP	temps_seconde	stop_x	stop_y	distance avec précédent	distance cumulée
AOUT1312E2L14813510021	13:45:00	13:45:00	AOUT13CP47012	1	0	1	12	E	2	x	13:45:00	290553	5046688	0.0	0.0
AOUT1312E2L14813510021	13:46:00	13:46:00	AOUT1341241	2	0	0	12	E	2		13:46:08	290701	5046856	438.1	438.1
AOUT1312E2L14813510021	13:47:00	13:47:00	AOUT1342793	3	0	0	12	E	2		13:46:42	290781	5046765	219.6	657.7
AOUT1312E2L14813510021	13:47:00	13:47:00	AOUT1346417	4	0	0	12	E	2		13:47:07	290863	5046632	161.9	819.5
AOUT1312E2L14813510021	13:50:00	13:50:00	AOUT13CP49012	5	1	0	12	E	2	x	13:50:00	291374	5047262	1105.7	1925.2
AOUT1312E2L15417140031	17:08:00	17:08:00	AOUT13CP47012	1	0	1	12	E	2	x	17:08:00	290553	5046688	0.0	0.0
AOUT1312E2L15417140031	17:09:00	17:09:00	AOUT1341241	2	0	0	12	E	2		17:09:08	290701	5046856	438.1	438.1
AOUT1312E2L15417140031	17:10:00	17:10:00	AOUT1342793	3	0	0	12	E	2		17:09:42	290781	5046765	219.6	657.7
AOUT1312E2L15417140031	17:10:00	17:10:00	AOUT1346417	4	0	0	12	E	2		17:10:07	290863	5046632	161.9	819.5
AOUT1312E2L15417140031	17:13:00	17:13:00	AOUT13CP49012	5	1	0	12	E	2	x	17:13:00	291374	5047262	1105.7	1925.2
AOUT1312E2L1810340013	10:28:00	10:28:00	AOUT13CP47012	1	0	1	12	E	2	x	10:28:00	290553	5046688	0.0	0.0
AOUT1312E2L1810340013	10:29:00	10:29:00	AOUT1341241	2	0	0	21	E	2		10:29:08	290701	5046856	438.1	438.1
AOUT1312E2L1810340013	10:30:00	10:30:00	AOUT1342793	3	0	0	12	E	2		10:29:42	290781	5046765	219.6	657.7
AOUT1312E2L1810340013	10:30:00	10:30:00	AOUT1346417	4	0	0	12	E	2		10:30:07	290863	5046632	161.9	819.5

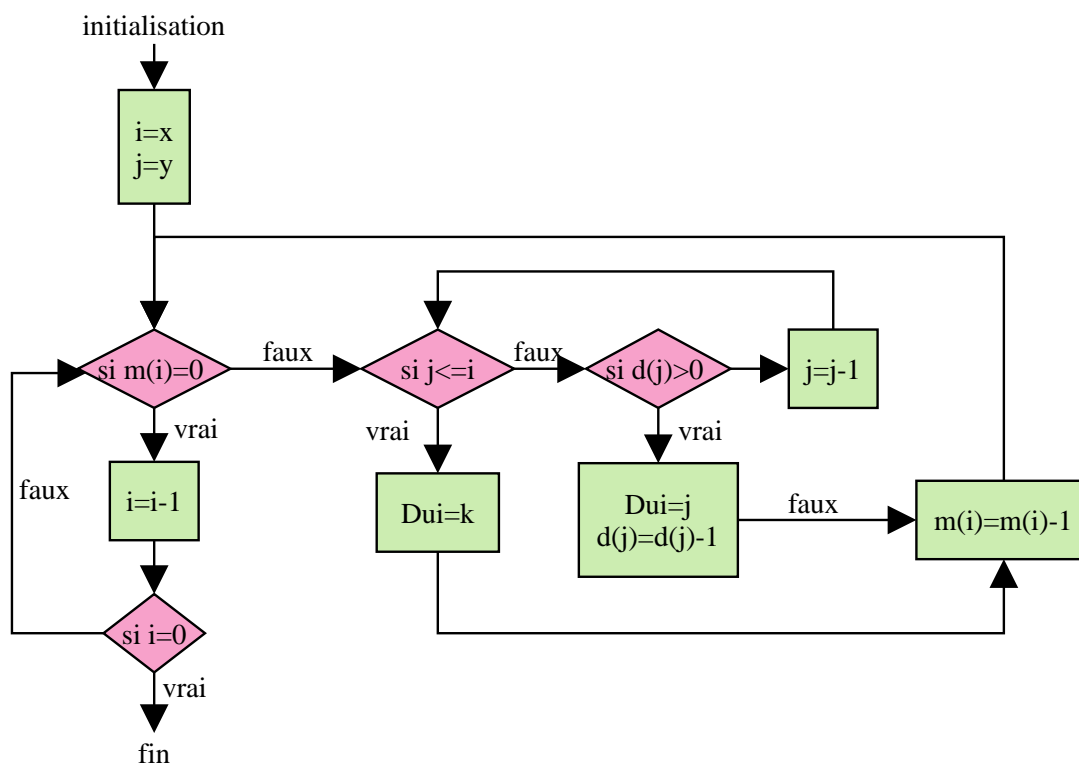
ANNEXE B – EXTRAIT DU FICHIER DE TRANSACTIONS DE CARTES À PUCE

	A	B	C	D	E	F	W	Y	AB	AC	AD	AJ	AK	AL	AN	AP	AQ
1	id	seq	code_emplacement	aot_eq	type_e	station	ligne	direction	type_oper	val	depl	dthr_operation	type	id_carte	mner	code_procmnemc	categ
2	1382874	1	36BPB--000706----01	36	BP		26	2	1	1	20130912122403	1	1000050	AMT	CALR	STL	Forfait_R
3	1382875	2	36BPB--000806----01	36	BP		26	1	1	2	20130912180936	1	1000050	AMT	CALR	STL	Forfait_R
4	1382972	1	36BPB--001310----01	36	BP		7	1	1	1	20130912054034	3	1000111	STL	CO-MB	STL	Autre
5	1382998	1	48BQB--029525----01	48	BQ		20	2	1	1	20130912073106	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
6	1382999	2	48BQB--029525----01	48	BQ		19	2	3	1	20130912074837	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
7	1383000	3	32TEM0288MZ0251N103	32	TE	288	6	1	3	1	20130912082136	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
8	1383001	4	32TEM0274MZ0201N104	32	TE	274	2	1	1	2	20130912161927	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
9	1383002	5	48BQB--029507----01	48	BQ		19	2	3	2	20130912164852	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
10	1383003	6	48BQB--029132----01	48	BQ		1	2	3	2	20130912173658	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
11	1383004	7	48BQB--029350----01	48	BQ		3	2	1	3	20130912195934	1	1000131	AMT		5 R.C	Forfait_O
12	1383027	1	32PVM0288MZ0251N101	32	PV	288	6	1	1	1	20130912083926	3	1000150	STM	T1OE5	STM	Autre
13	1383028	2	32BPB--025221----01	32	BP		97	5	3	1	2139129436	3	1000150	STM	T1OE5	STM	Autre
14	1383089	1	36BPB--009809----01	36	BP		73	2	1	1	20130912092753	1	1000194	AMT	CALR	STL	Forfait_R
15	1383090	2	36BPB--000208----01	36	BP		151	1	1	2	20130912164154	1	1000194	AMT	CALR	STL	Forfait_R
16	1383091	3	36BPB--000919----01	36	BP		76	2	3	2	20130912173701	1	1000194	AMT	CALR	STL	Forfait_R
17	1383092	4	36BPB--000908----01	36	BP		50	1	1	3	20130912182458	1	1000194	AMT	CALR	STL	Forfait_R
18	1383150	1	36BPB--000605----01	36	BP		24	2	1	1	20130912073419	1	1000222	AMT		41 R.C	Forfait_R

Enrichissement :
-type d'opération
-déplacement

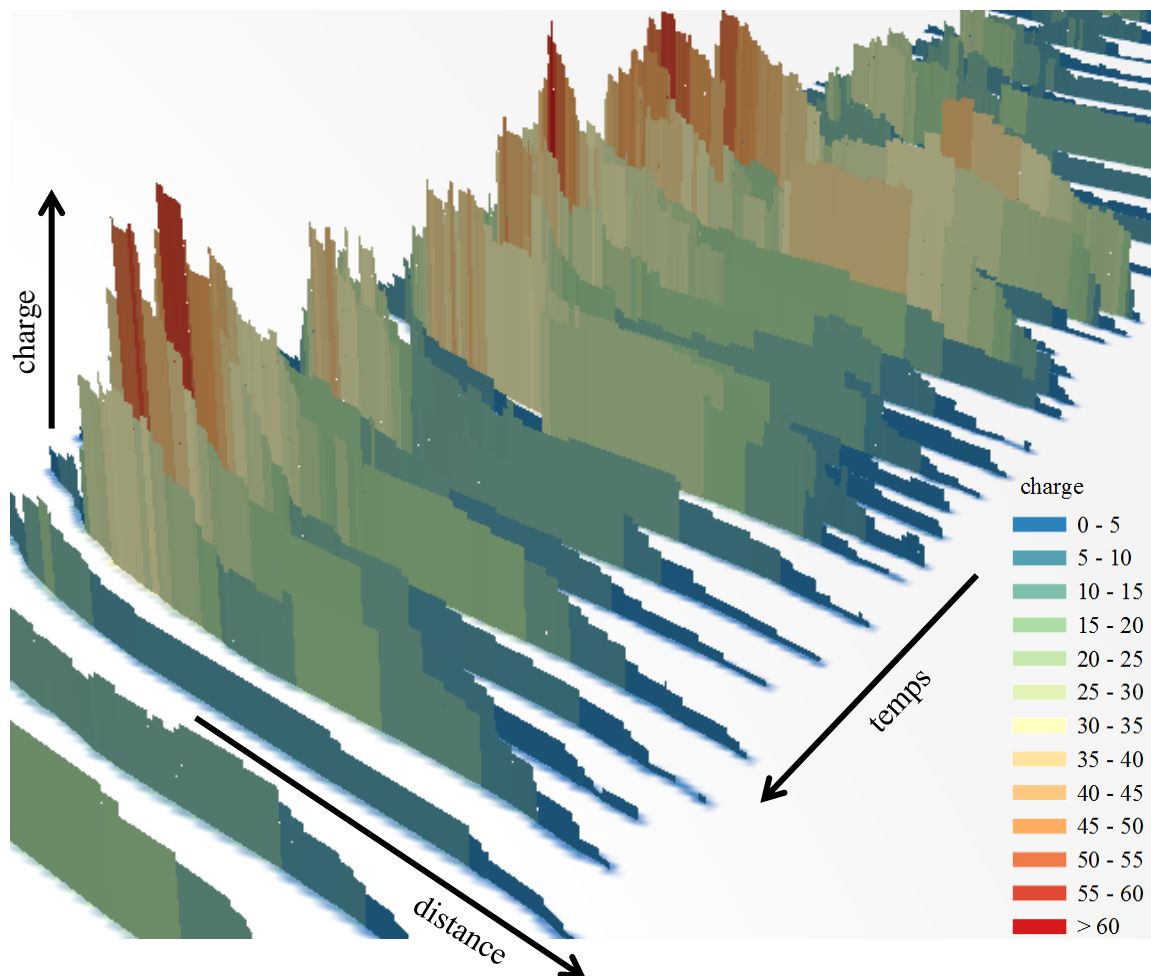
ANNEXE C – DIAGRAMME POUR LA MÉTHODE DE RÉPARTITION DES ARRÊTS DE DESCENTE

i : arrêt de montée
j : arrêt de descente
k : arrêt avec le plus haut taux de probabilité de descente
m(i) : montants à l'arrêt *i*
d(j) : descendants à l'arrêt *j*
Dui : arrêt de descente de l'utilisateur *u* monté à l'arrêt *i*
x : dernier arrêt avec au moins un montant
y : dernier arrêt avec au moins un descendant



ANNEXE D – PROFILS DE CHARGE

Profils de charge de voyages consécutifs d'une même ligne en après-midi



Visualisation réalisée avec l'extension Qgis3threajs de QGIS, permettant la représentation d'objets sur une troisième dimension.

ANNEXE E – EXTRAITS DES FICHIERS PRÉPARÉS POUR UNE SIMULATION DANS TRANSIMS

Node : nœuds du réseau

NODE	X_COORD	Y_COORD	Z_COORD	NOTES
40252	291551	5046261		0 Network Node
40902	290573	5041524		0 Network Node
40904	296892	5046715		0 Network Node
40925	301742	5049919		0 Network Node
40935	301729	5049959		0 Network Node
41004	288407	5048566		0 Network Node

Link : liens constituant le réseau routier

LINK	STREET	ANODE	BNODE	LENGTH	SETBACK_A	SETBACK_B	BEARING_A	BEARING_B	TYPE	LANES_AB	LEFT_AB	RIGHT_AB	SPEED_AB	FSPD
470121	0	47012	41241	552.2	0	0	128	111	LOCAL	1	0	0	30	
412411	0	41241	42793	157.8	0	0	357	186	LOCAL	1	0	0	30	
427931	0	42793	46417	175.2	0	0	96	209	LOCAL	1	0	0	30	
464171	0	46417	49012	1114.8	0	0	106	196	LOCAL	1	0	0	30	
490121	0	49012	45053	154.1	0	0	118	231	LOCAL	1	0	0	30	
450531	0	45053	45052	138.5	0	0	179	249	LOCAL	1	0	0	30	
450521	0	45052	45051	126.6	0	0	182	245	LOCAL	1	0	0	30	

FSPD_AB	CAP_AB	LANES_BA	LEFT_BA	RIGHT_BA	SPEED_BA	FSPD_BA	CAP_BA	USE	NOTES
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link
20	800	0	0	0	0	0	0	0 ANY	Network Link

Activity_Location : lieux d'activité

LOCATION	LINK	NODE	OFFSET	X_COORD	Y_COORD	ZONE	NOTES
470121	470121	41241	551.2	290553	5046688		0 Transit Stop
412411	412411	42793	156.8	290701	5046856		0 Transit Stop
427931	427931	46417	174.2	290781	5046765		0 Transit Stop
464171	464171	49012	1113.8	290863	5046632		0 Transit Stop
490121	490121	45053	153.1	291374	5047262		0 Transit Stop
450531	450531	45052	137.5	291342	5047134		0 Transit Stop
450521	450521	45051	125.6	291280	5047024		0 Transit Stop

node

Process_Link : liens de transitions

ACCESS	FROM_ID	FROM_TYPE	TO_ID	TO_TYPE	TIME	COST	NOTES
4701210	470121	ACTIVITY	470121	TRANSIT	5	0	Transit Access
4701211	470121	TRANSIT	470121	ACTIVITY	5	0	Transit Egress
4124110	412411	ACTIVITY	412411	TRANSIT	5	0	Transit Access
4124111	412411	TRANSIT	412411	ACTIVITY	5	0	Transit Egress
4279310	427931	ACTIVITY	427931	TRANSIT	5	0	Transit Access
4279311	427931	TRANSIT	427931	ACTIVITY	5	0	Transit Egress
4641710	464171	ACTIVITY	464171	TRANSIT	5	0	Transit Access
4641711	464171	TRANSIT	464171	ACTIVITY	5	0	Transit Egress

Lane_Connectivity : connecteurs de liens

NODE	IN_LINK	OUT_LINK	IN_LOW	IN_HIGH	OUT_LOW	OUT_HIGH	TYPE	PENALTY	SPEED	CAPACITY
41241	470121	1	1	1	1	1		0	0	0
41241	470121	412411	1	1	1	1		0	0	0
42793	412411	2	1	1	1	1		0	0	0
42793	412411	427931	1	1	1	1		0	0	0
46417	427931	3	1	1	1	1		0	0	0
46417	427931	464171	1	1	1	1		0	0	0
46417	427931	464172	1	1	1	1		0	0	0

Transit_Stop : arrêts, positionnés sur les liens du réseau

STOP	NAME	LINK	NODE	OFFSET	USE	TYPE	SPACE	NOTES
470121	Cartier / Saint-Hubert [41241]	470121	41241	222.8	BUS	STOP	2	
412411	Saint-Hubert / De Quimper [42793]	412411	42793	120.2	BUS	STOP	2	
427931	Saint-Hubert / Saint-Eusèbe [46417]	427931	46417	155.2	BUS	STOP	2	
464171	Juge-Desnoyers / Face Au 520 [49012]	464171	49012	810.2	BUS	STOP	2	
490121	Juge-Desnoyers / Face Au 400 [45053]	490121	45053	131.0	BUS	STOP	2	

Transit_Route : liste de la séquence d'arrêts parcourue par chaque ligne

ROUTE	NSTOPS	MODE	NAME
STOP	ZONE	TIMEPT	
1222	5	BUS	1222
470121	0	1	
412411	0	1	
427931	0	1	
464171	0	1	
4641711	0	1	
1241	10	BUS	1241
490121	0	1	
450531	0	1	
450521	0	1	
450511	0	1	

ligne →

arrêts {

##

ligne direction

N : 1
S : 3
E : 2
O : 4

tracé

Transit_Driver : liste des liens empruntés successivement, avec le nœud de destination

ROUTE	NLINKS	VEHTYPE	SUBTYPE
LINK	NODE		
1222	4	4	0
470121	41241		
412411	42793		
427931	46417		
464171	49012		
1241	9	4	0
490121	45053		
450531	45052		
450521	45051		
450511	45050		

ligne →

liens {

Transit_Schedule : liste des heures de passage à chaque arrêt des différents voyages

ROUTE	TIME	STOP
222	91440	481262
222	91500	413421
222	91560	413601
222	91560	413801
222	91620	413951
222	91680	413231
222	91680	413251
222	91680	413271

ANNEXE F – EXEMPLE DE RÉSULTATS GLOBLAUX D’UNE AFFECTATION DYNAMIQUE DANS TRANSIMS

Summary Variable	Value
Single Numerical Results	
EXECUTION_TIME_SECONDS	3.0
NUMBER_OF_ACTIVITY_LOCATION_FILE_RECORDS	2855
NUMBER_OF_DIRECTIONAL_LINKS	9174
NUMBER_OF_INPUT_PLANS	194153
NUMBER_OF_INPUT_RECORDS	1232484
NUMBER_OF_INPUT_TRAVELERS	59021
NUMBER_OF_INPUT_TRIPS	58896
NUMBER_OF_LANE_CONNECTIVITY_FILE_RECORDS	6884
NUMBER_OF_LINK_FILE_RECORDS	4587
NUMBER_OF_NEW_LINK_DELAY_FILE_RECORDS	0
NUMBER_OF_NEW_LINK_VOLUME_FILE_RECORDS	4587
NUMBER_OF_NEW_TRANSIT_RIDERSHIP_FILE_RECOR...	12706
NUMBER_OF_NEW_TRIP_TABLE_FILE_RECORDS	0
NUMBER_OF_NEW_TRIP_TABLE_FILE_TRIPS	0
NUMBER_OF_NEW_ZONE_SKIM_FILE_RECORDS	0
NUMBER_OF_NODE_FILE_RECORDS	2623
NUMBER_OF_PARKING_FILE_RECORDS	5614
NUMBER_OF_PLAN_FILES	1
NUMBER_OF_PROCESS_LINK_FILE_RECORDS	11228
NUMBER_OF_TRANSIT_DRIVER_DATA_RECORDS	111
NUMBER_OF_TRANSIT_DRIVER_FILE_RECORDS	5862
NUMBER_OF_TRANSIT_ROUTE_DATA_RECORDS	111
NUMBER_OF_TRANSIT_ROUTE_FILE_RECORDS	5973
NUMBER_OF_TRANSIT_SCHEDULE_FILE_RECORDS	135440
NUMBER_OF_TRANSIT_STOP_FILE_RECORDS	2855
SUMMARY_TIME_INCREMENT	15
TOTAL_NUMBER_OF_TRANSFERS	8670
TOTAL_NUMBER_OF_TURNS	0
TOTAL_PASSENGER_HOURS_OF_TRAVEL	19038.7
TOTAL_PASSENGER_MILES_OF_TRAVEL	298083.1
TOTAL_PASSENGER_TRIPS	58896
TOTAL_VEHICLE_HOURS_OF_TRAVEL	0.0
TOTAL_VEHICLE_MILES_OF_TRAVEL	0.0
TOTAL_VEHICLE_TRIPS	0